



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Exploración de la viabilidad para uso de la fibra de fique como material sostenible en el reforzamiento del concreto. Un enfoque eco-amigable como alternativa de la fibra de polipropileno

Arq. Linda Stefany de Moya Abril

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes. Maestría en Construcción
Bogotá, D.C., Colombia
2021

Exploración de la viabilidad para uso de la fibra de fique como material sostenible en el reforzamiento del concreto. Un enfoque eco-amigable como alternativa de la fibra de polipropileno

Arq. Linda Stefany de Moya Abril

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Construcción

Director:

Paulo Andrés Romero Larrahondo MSc. PhD.

Línea de Investigación:

Nuevos Materiales Sostenibles

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Artes. Maestría en Construcción

Bogotá, D.C., Colombia

2021

“El trabajo constante perfecciona tus deficiencias”

Anónimo

*A mi madre, quien ha sido mi mayor ejemplo,
de que con perseverancia y esfuerzo es
posible lograr lo que te propones.*

*Un poco más de persistencia, un poco más de
esfuerzo, y lo que parecía irremediablemente
un fracaso puede convertirse en un éxito
glorioso.*

Elbert Hubbard.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Arq. Linda Stefany de Moya Abril

30/09/2021

Fecha

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por esta oportunidad de superación personal y profesional que me dio, por haberme ayudado en cada paso de esta investigación, por ser el inspirador y darme fuerzas para continuar en el proceso de obtener uno de los anhelos más deseados. Tu amor y tu bondad me han permitido sonreír ante todos mis logros que han sido resultado de tu ayuda.

A mi madre, Morelia Abril Romero, quien me mostró el camino hacia la superación, quien no perdió la fe en mí, quien me enseñó a que debemos ser perseverantes para poder lograr cualquier objetivo que te propongas. Agradezco su paciencia y su amor en mi formación la cual me motivó constantemente a ser una mejor persona, una mejor profesional. Este logro es para ti. A mi hermano, Janniver De Moya Abril, por siempre apoyarme, escucharme y darme ánimos en los momentos precisos. A William Suárez, por el apoyo que me ha dado en cada momento, sobre todo en los momentos y situaciones más difíciles. No fue sencillo culminar este proyecto, sin embargo, siempre fuiste muy motivador y esperanzador dándome apoyo a diario para no desistir.

Agradezco a mi director de tesis, Paulo Andrés Romero L., persona de gran sabiduría, quien se ha esforzado por guiarme en tan importante tarea; por su paciencia, ya que sencillo no fue el proceso de investigación, pero gracias a su experiencia, dedicación y su perseverancia en compartirme sus conocimientos, he logrado culminar el desarrollo de mi tesis de investigación con éxito.

A mis formadores de la maestría, por compartirme su conocimiento y de alguna u otra forma aportar conocimiento en el desarrollo de mi investigación.

Resumen

Con base en un estudio de caso simple, se realizó un análisis comparativo entre las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno (PP), basado en la revisión de la literatura existente en artículos y tesis de investigación, elaboradas en Latinoamérica y algunos países asiáticos, con el fin de identificar sus impactos ambientales tanto positivos como negativos, y establecer las ventajas y desventajas técnicas de una frente a la otra como material de refuerzo, para disminuir la fisuración por contracción plástica del concreto.

Actualmente, se cuenta con seis investigaciones sobre fibras de fique, realizadas en Colombia, en las que se identificó dicha fibra como material de potencial para el control del agrietamiento del concreto y el mejoramiento de sus propiedades. Así pues, surgió el interés de la autora en llevar a cabo un estudio técnico ambiental comparativo, en virtud de la ausencia de estudios que identifiquen el impacto ambiental que estas generan por medio del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las fibras, el cual se desarrolló con los parámetros establecidos por la NTC ISO 14040 (2007) y la ISO 14044 (2007).

Así mismo, se comparó la resistencia del concreto reforzado con fibras de fique vs. fibras de PP, confrontando los resultados obtenidos de esta investigación con los estudios de otros investigadores, permitiendo de esta manera identificar que la adición de fibras de fique disminuye la resistencia a compresión, pero aumenta la resistencia a la flexión de los concretos. Por otra parte, el ACV realizado de la cuna a la puerta, permitió identificar que las fibras de fique producen 0.57 kg eq. de CO₂ por kg de fibra, mientras que el proceso de manufactura de 1 kg de fibras de PP emite 2.06 kg eq. de CO₂. De tal manera que se identificó la fibra de fique como material de potencial, debido a las ventajas ambientales que esta aporta.

Palabras clave: Fique, fibras naturales, fibras sintéticas, polipropileno, análisis de ciclo de vida, concreto, concreto reforzado con fibras.

Abstract

Viability exploration of the Fiber fique as a sustainable material for concrete reinforcement. An eco-friendly approach as an alternative to polypropylene fiber.

Based on a simple case study, a comparative analysis was made between fique fibers vs. polypropylene (PP) fibers, based on a review of the existing literature in articles and research theses, elaborated in Latin America and some Asian countries, in order to identify their environmental impacts, both positive and negative, and to establish the technical advantages and disadvantages of one versus the other as a reinforcement material, to reduce the plastic shrinkage cracking of concrete. Currently, there are six investigations on fique fibers, carried out in Colombia, in which said fiber was identified as a potential material for the control of concrete cracking and the improvement of its properties. Thus, the author's interest in carrying out a comparative technical environmental study arose, due to the absence of studies that identify the environmental impact that these generate through the Life Cycle Analysis (LCA) of the fibers, which was developed with the parameters established by NTC ISO 14040 (2007) and ISO 14044 (2007).

Likewise, the resistance of concrete reinforced with fique fibers was compared vs. PP fibers, comparing the results obtained from this research with the studies of other researchers, thus allowing to identify that the addition of fique fibers decreases the compressive strength, but increases the flexural strength of the concretes. On the other hand, the LCA carried out from the cradle to the door, allowed to identify that the fique fibers produce 0.57 kg eq. of CO₂ per kg of fiber, while the manufacturing process of 1 kg of PP fibers emits 2.06 kg eq. of CO₂. In such a way fique fiber was identified as a potential material, due to the environmental advantages that it provides.

Keywords: Fique, natural fibers, synthetic fibers, polypropylene, life cycle analysis, concrete, fiber reinforced concrete.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Abstract	VIII
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIX
Introducción	1
Planteamiento del problema	5
1.1 Justificación.....	6
1.1.1 Conveniencia del uso de fibras de fique vs. fibras de polipropileno en el reforzamiento del concreto	6
1.1.2 Uso racional de fibras sintéticas y naturales para el reforzamiento del concreto	8
1.1.3 Implicaciones practicas del uso de fibras de fique vs. fibras de polipropileno para el reforzamiento del concreto	10
1.1.4 Avances de investigaciones en fibras naturales aplicadas en el reforzamiento del concreto en algunos países de Latinoamérica	11
1.1.5 Valor teórico de la investigación	12
1.1.6 Viabilidad de la investigación	13
1.1.7 Beneficios del uso de fibras de polipropileno en el reforzamiento del concreto	14
1.1.8 Beneficio del uso de fibras naturales como el fique para el reforzamiento del concreto.	15
1.1.9 Deficiencia del conocimiento del problema de investigación	16
1.2 Preguntas de Investigación	17
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general.....	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
Marco teórico	21
1.4 Fibras naturales como material en la industria de la construcción en Colombia	22
1.5 Fibras naturales como material de refuerzo en concreto en Colombia	24

1.6	Beneficio uso y aplicaciones de las fibras naturales en la industria de la construcción en Colombia	26
1.7	Investigaciones en fibras naturales aplicadas al reforzamiento del concreto desarrolladas en Latinoamérica.....	28
1.8	Aprovechamiento de fibras de fique como material alternativo de refuerzo en concreto	31
1.9	Beneficio ambiental del uso de fibras naturales en el desarrollo de materiales alternativos como refuerzo en concreto	33
1.10	Fibras de fique en Colombia	34
1.10.1	Procesamiento de la fibra de fique	35
1.10.2	Impactos ambientales en la producción del fique en Colombia.....	37
1.10.3	Fibra de fique en el reforzamiento del concreto en Colombia	38
1.10.4	Composición química de las fibras de fique.....	41
1.10.5	Comportamiento mecánico de las fibras de fique	42
1.10.6	Durabilidad de las fibras de fique	42
1.10.7	Tratamiento de las fibras de fique	43
1.11	Uso de fibras sintéticas en Colombia	44
1.11.1	Beneficios, uso y aplicaciones de las fibras sintéticas en el concreto	44
1.11.2	Aspectos técnicos de las fibras de polipropileno.....	45
1.11.3	Microfibras de polipropileno.....	46
1.11.4	Evaluación de desempeño y normas de las fibras sintéticas	46
1.11.5	Fibras sintéticas como material de refuerzo en concretos	47
1.11.6	Investigaciones en fibras de polipropileno para el reforzamiento del concreto	48
1.11.7	Línea de tiempo, investigaciones en fibras de polipropileno	51
1.11.8	Producción de polipropileno	54
1.11.9	Proceso de obtención de fibras de polipropileno	55
1.11.10	Propiedades de las fibras de polipropileno	56
1.11.11	Propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno en concreto fibroreforzado.....	57
1.11.12	Durabilidad de las fibras de polipropileno	58
1.11.13	Impactos ambientales en la producción de las fibras de polipropileno....	58
1.12	Concreto reforzado con fibras de polipropileno recicladas	59
1.13	Análisis de ciclo de vida de las fibras	60
1.13.1	Análisis de ciclo de vida de la cuna a la puerta	61
1.13.2	Definición objetivo y alcance	62
1.13.3	Desarrollo del inventario del ciclo de vida (ICV).....	67
1.13.4	Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV).....	68
1.13.5	Interpretación del análisis de ciclo de vida ACV	70
1.13.6	Correlación del ACV con la producción de fibras de polipropileno	72
1.14	Herramienta informática utilizada para el análisis de ciclo de vida	75
1.14.1	Método TRACI 2.1 para el análisis de ciclo de vida.....	76
	Diseño del estudio de investigación.....	78
1.15	Fase 1 de la investigación.....	80
1.16	Fase 2 de la investigación.....	84
1.17	Fase 3 de la investigación.....	87
1.18	Diseño de instrumentos	88
1.19	Análisis de datos.....	89

Recolección de la información	91
1.20 Descripción del proceso de elaboración de la fibra de fique	92
1.21 Descripción del proceso de elaboración de la fibra de polipropileno.....	95
1.22 Triangulación de los datos.....	99
1.22.1 Emisiones de dióxido de carbono de la fibra de polipropileno	104
Resultados	107
1.23 Resultados análisis de ciclo de vida fibras de fique	107
1.24 Resultado análisis de ciclo de vida fibras de polipropileno	111
Discusión	117
1.25 Viabilidad ambiental de las fibras de fique.....	118
1.26 Viabilidad ambiental de las fibras de polipropileno	119
1.27 Viabilidad ambiental de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno	120
1.27.1 Viabilidad ambiental de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno adicionadas en un concreto de 3000 psi.	122
1.28 Viabilidad técnica de las fibras de fique vs. fibras de polipropileno	123
Conclusiones	129
1.29 Ventajas y desventajas de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno....	133
Recomendaciones	135
Referencias Bibliográficas	137
Anexo A: Investigaciones desarrolladas	145
Anexo B: Protocolo de selección y meta-análisis	152
Anexo C: Resultados ACV GaBi	157

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1. Diagrama de flujo mapa de literatura	22
Figura 2-2. Investigaciones desarrolladas en fibras naturales aplicadas al concreto en Colombia.....	26
Figura 2-3. Tipo de fibra natural estudiada para el reforzamiento del concreto en Latinoamérica.....	31
Figura 2-4. Proceso de obtención de la fibra de fique.....	36
Figura 2-5. Fibras de polipropileno aplicadas como reforzamiento del concreto	49
Figura 2-6. Investigaciones en fibras naturales y sintéticas como refuerzo en concretos desde el año 2009 hasta el año 2020.....	54
Figura 2-7. Producción global de polipropileno	55
Figura 2-8. Fases del ACV.....	61
Figura 2-9. Fases del ACV de la “Cuna a la puerta”	62
Figura 2-10. Esquema de la fase de EICV según la norma ISO 14040.....	69
Figura 2-11. Relaciones entre los elementos en la fase de interpretación con otras fases del ACV.....	70
Figura 2-12. Valores de recursos materiales y emisiones al agua dulce en la etapa de producción para los escenarios de producción evaluados con transporte (unidad funcional: 25 kg, unidad de normalización de polipropileno: kilogramo, cantidad de ponderación: masa).....	73
Figura 2-13. Porcentaje de contribución relativa de los materiales de entrada-salida y los flujos de energía en la fase de producción.	73
Figura 2-14. Valores de los impactos ambientales en la fase de fabricación con transporte. (Unidad funcional 25 kg de polipropileno, metodología CML 2016, método de ponderación: ciclo de vida de thinkstep).	74
Figura 3-1. Método de investigación.....	79

Figura 3-2. Pasos del proceso de búsqueda de literatura.....	81
Figura 3-3. Etapas del ciclo de vida del producto ISO 14044 2007.....	84
Figura 3-4. Etapas de la revisión sistemática de literatura.....	88
Figura 4-1. Entradas y salidas ACV fibras de fique.	92
Figura 4-2. Diagrama de ciclo de vida de la fibra de fique.	93
Figura 4-3. Sistema de producción del polipropileno granulado.	95
Figura 4-4. Diagrama producción de fibras de polipropileno.....	96
Figura 4-5. Entradas y salidas del ACV de las fibras de polipropileno.	97
Figura 4-6: Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de fique comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.	101
Figura 4-7. Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.....	102
Figura 4-8. Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de polipropileno comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.	103
Figura 4-9. Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de polipropileno comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.	104
Figura 5-1. Impacto ambiental de la producción de 1000 kg de fibras de fique.....	108
Figura 5-2. Diagrama de sankey de la fibra de fique de la cuna a la puerta. Método de análisis de impacto TRACI 2.1.	108
Figura 5-3. Agotamiento fósil de la producción de 1000 kg de fibra de fique.	109
Figura 5-4. Emisiones de dióxido de carbono por proceso del sistema de producción de 1 kg de fibras de PP.....	110
Figura 5-5. Diagrama de flujo entradas y salidas del proceso de manufactura de la fibra de fique.....	111
Figura 5-6. Emisiones de dióxido de carbono por proceso del sistema de producción de 1 kg de fibras de PP.....	112
Figura 5-7. Impactos ambientales por kg de fibra de polipropileno.....	113
Figura 5-8. Diagrama de sankey del proceso de manufactura de la fibra de polipropileno. Método de análisis de impacto TRACI 2.1	114
Figura 5-9. Diagrama de flujo entradas y salidas del proceso de manufactura de la fibra de polipropileno.	114
Figura 6-1. Emisiones al aire por kg de fibras de fique y fibras de polipropileno.....	121
Figura 6-2. Valores de los impactos ambientales por kg de fibra.....	122

Figura 6-3. Impactos ambientales asociados al proceso de fabricación de 3.3 kg de fibras de fique vs. 2 kg de fibras de polipropileno.....	123
Figura 6-4. Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique vs. fibras de polipropileno.....	125
Figura 6-5. Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique vs. fibras de polipropileno.....	126

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1.1 Investigaciones en fibras de fique como material de construcción en Colombia	7
Tabla 2.1 Fibras con mayor aplicación en los diferentes tipos de industria.	27
Tabla 2.2 Investigaciones en fibras naturales como refuerzo en el concreto en países de Latinoamérica.	30
Tabla 2.3 Área, producción y rendimiento del fique a nivel departamental.	35
Tabla 2.4 Composición química de las fibras de fique.	36
Tabla 2.5 Investigaciones desarrolladas en la aplicación de la fibra de fique como material de refuerzo en concreto en Colombia.	39
Tabla 2.6 Investigaciones para desarrolladas sugeridas por investigadores de Latinoamérica en el campo de las fibras naturales aplicadas al reforzamiento del concreto.	40
Tabla 2.7 Composición química de los principales constituyentes de las fibras de fique aplicadas en el reforzamiento del concreto en Colombia.	42
Tabla 2.8. Propiedades mecánicas de las fibras de fique.	42
Tabla 2.9 Proceso producción de polipropileno.	56
Tabla 2.10 Características físicas y químicas de las fibras de polipropileno	57
Tabla 2.11 Propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno.	58
Tabla 2.12 Categorías de impacto seleccionadas para la investigación.	69
Tabla 3.1 Proceso análisis de datos cualitativos.	90
Tabla 4.1 Inventario ACV de la producción de 1 kg de fibras de fique.	94
Tabla 4.2 Etapas del proceso de manufactura de la fibra de fique.	95
Tabla 4.3 Inventario ACV fabricación de 1 kg de fibras de polipropileno.	98
Tabla 4.4 Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras fique comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.	100

Tabla 4.5 Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.....	101
Tabla 4.6 Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de polipropileno comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.	102
Tabla 4.7 Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de polipropileno comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.	103
Tabla 4.8 Huellas ambientales de componentes particulares del sistema de producción de polipropileno.	104
Tabla 4.9 Emisiones de dióxido de carbono por kg de polipropileno.	105
Tabla 6.1 Emisión de dióxido de carbono y agotamiento de agua por kg de fibra de polipropileno.	120
Tabla 6.2 Emisiones al aire por tipo de fibra.	121
Tabla 6.3 Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de fique vs. fibras de polipropileno.	125
Tabla 6.4 Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique vs. fibras de polipropileno.	126
Tabla 7.1 Propiedades de las fibras de fique vs. fibras de polipropileno.	131
Tabla 7.2 Cuadro comparativo ventajas y desventajas técnicas y ambientales de las fibras de fique vs. fibras de PP.....	134
Tabla 1. Investigaciones desarrolladas en la aplicación de la fibra de guadua como material de refuerzo en concreto en Colombia.....	145
Tabla 2. Investigaciones realizadas con fibras de coco para el reforzamiento del concreto.	146
Tabla 3. Investigaciones realizadas en fibras de bagazo de caña como material de refuerzo en el concreto en Colombia.....	147
Tabla 4. Investigaciones desarrolladas de fibras de cáñamo para el reforzamiento del concreto en Colombia.....	148
Tabla 5. Investigaciones desarrolladas en concreto reforzado con fibras vegetales en Latinoamérica.....	149
Tabla 6. Hoja de protocolo de selección. Elaborada por el Autor.	152
Tabla 7. Hoja de protocolo de selección. Elaborada por el Autor.	153
Tabla 8. Hoja de protocolo de selección. Elaborada por el Autor.	154
Tabla 9. Hoja de protocolo de selección. Elaborada por el Autor.	155

Tabla 10. Forest plot para evaluar la heterogeneidad. Concreto con fibras de naturales vs. Concreto simple para el mejoramiento de la resistencia a compresión y flexión.	156
Tabla 11. Emisiones del proceso de manufactura de las fibras de polipropileno. Elaborado por el autor.....	157
Tabla 12. Emisiones del proceso de manufactura de las fibras de fique. Elaborado por el autor.	157

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviatura	Término
ACV	Análisis de ciclo de vida
CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
ICV	Inventario de ciclo de vida
ISO	International Organization for Standardization
Kg. Eq CO ₂	Kilogramos equivalentes de dióxido de carbono
CH ₄	Metano
Kg. Eq C ₂ H ₄	Kilogramos equivalentes de etileno
MJ	Mega Joules
MPa	Mega Pascales
NO _x	Óxidos de nitrógeno
N ₂ O	Óxido nitroso
NTC	Norma Técnica Colombiana
PP	Polipropileno
EICV	Evaluación de impacto de ciclo de vida
DS	Desarrollo sostenible

Introducción

El conocimiento de las fibras naturales, como recurso en la construcción sostenible que permite un impacto ambiental menor, en comparación con las fibras sintéticas, es invaluable, debido a que dichas fibras se pueden cultivar localmente, y requieren de una baja cantidad de energía para su procesamiento, con consecuencias en la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, asociadas al transporte y fabricación con un nivel de ahorro de energía incorporada. (Zhou, Saini, & Kastiukas, 2017).

Por medio de la revisión de la literatura existente, se identificaron alrededor de 20 investigaciones sobre fibras naturales como material de refuerzo en concreto desarrolladas entre 2008 y 2020 en fibras, tales como el coco (Escudero & Aristizábal, 2016); fique (Jaramillo, 2017); plátano, bagazo de caña (Jiménez & Torres, 2020), y algunos tipos de bambúes (Martínez & Poveda, 2018). Sin embargo, existen interrogantes que impiden su aplicación en el concreto de alta resistencia (Pérez, 2014), lo que induce a considerar que aún no se ha consolidado su aplicación, a causa de los interrogantes que deben ser resueltos a falta de mayores investigaciones. De ahí, el interés particular de la autora en conocer cuáles han sido los interrogantes que se han tomado en consideración para la aplicación de fibras naturales en el concreto, y cuál es su relación con la sostenibilidad, planteados en el desarrollo del documento de tesis.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal, determinar los impactos ambientales positivos y negativos que podría ocasionar la fibra de fique como material de refuerzo en el concreto, comparados con los mismos impactos asociados a la fibra de polipropileno: aportar al establecimiento de ventajas y desventajas de una fibra frente a la otra; tener en cuenta su relación con la sostenibilidad; tomar como objetivo el uso sostenible de los recursos naturales; respetar los principios ecológicos que tienen que ver con la reutilización y conservación de los recursos, o mejor aún, usar recursos que sean reciclables y renovables para la construcción (Umacon, 2016).

El estudio estará limitado al análisis del ciclo de vida de la cuna a la puerta de dicha fibra comparada con las fibras de polipropileno, ya que actualmente no se conoce aún a ciencia cierta si estas fibras, por ser naturales, son ambientalmente viables para su implementación como material de refuerzo en concreto. Sin embargo, existen estudios donde se establece que las fibras naturales como las fibras de fique son alternativas a menor costo y promueven el desarrollo sostenible (DS), debido a que son materiales renovables y reciclables. Resaltando que, las fibras de fique, al ser naturales, generalmente están disponibles en abundancia en gran parte de los países desarrollados (Ali, 2016).

De otro lado, esta investigación determina la viabilidad técnica de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno, con el fin de identificar los beneficios que cada una aporta, como también, identificar las desventajas técnicas que generan como material adicionado a los concretos.

Para cumplir con el objetivo de investigación, se realizó una revisión sistemática de literatura utilizando la metodología establecida por Sánchez (2010), estableciendo un protocolo de búsqueda según guía para planificar, preparar y publicar la investigación, diseñada para mejorar la integridad del informe de revisiones sistemáticas y metaanálisis (Moher et al., 2016).

Para la elaboración del estudio, la primera pregunta de investigación que permitió direccionarlo fue: ¿Cuál es la viabilidad ambiental y técnica del uso de fibras de fique como material alternativo vs. la fibra de polipropileno aplicada en el reforzamiento del concreto?

Dicho interrogante está relacionado con aspectos ambientales asociados al diseño, fabricación, uso y reciclaje del material, de tal modo que para comparar ambientalmente las fibras mencionadas se tomó como fundamento la ISO 14040 (2017) del ACV.

Por otra parte, como metodología de investigación, se desarrolló un estudio de caso holístico de tipo descriptivo no experimental con una única unidad de análisis. Según Yin, (2017), el estudio de caso único puede representar una contribución significativa al conocimiento y a la construcción de teorías por confirmar o ampliar la teoría; por tanto, con la presente investigación se contribuyó con teoría que permitiera orientar futuras

investigaciones en el campo de las fibras naturales como material de refuerzo en concreto desde el aspecto ambiental. Aunque ya existen investigaciones en el campo, actualmente en la literatura existente no se tiene un comparativo ambiental y técnico entre el uso de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno como refuerzo en concretos.

El planteamiento del problema fue desarrollado según los lineamientos de Hernández, Fernández, & Baptista (2014), mediante una inmersión inicial del conocimiento en concreto reforzado con fibras. Se establecieron unos objetivos, y se evaluó la deficiencia en el conocimiento, haciendo un aporte en el campo de las fibras naturales con un marco teórico como base teórica para futuras investigaciones.

Así mismo, se integraron unos anexos como complemento del estudio; la tabla 1, por ejemplo, está referida a las investigaciones desarrolladas en la aplicación de la fibra de guadua como material de refuerzo en concreto en Colombia. La tabla 5, a las investigaciones desarrolladas en concreto reforzado con fibras naturales en Latinoamérica, entre otras.

Se desarrolló un estudio exploratorio descriptivo por medio de la revisión de literatura, el cual se elaboró con la ecuación de búsqueda (*Natural fibers for concrete reinforcement*) para identificar, seleccionar y analizar investigaciones con fibras naturales aplicadas como material de refuerzo en concreto, desde el año 2008 al 2020 en Latinoamérica y en algunos países de Asia. En cuanto a las fibras sintéticas, se efectuó el reconocimiento de literatura existente mundialmente, en los últimos 10 años, lo cual permitió identificar el estado del conocimiento en fibras aplicadas en concreto fibroreforzado.

Ahora bien, con el análisis comparativo entre las dos fibras, se contribuye con el establecimiento de ventajas y/o desventajas técnicas y ambientales para que futuras investigaciones puedan tomar como base el presente trabajo.

Actualmente, se han encontrado seis investigaciones en Google, de tesis de investigación sobre fibras de fique, evaluadas técnicamente teniendo en cuenta sus propiedades físicas y mecánicas. Entre estas investigaciones se destacan dos autores, Pérez (2014) y Pinto & Figueroa (2016), quienes han obtenido resultados positivos.

Es importante resaltar como punto a favor, que Colombia es uno de los mayores productores de fique en Latinoamérica, logrando cultivar hasta treinta mil toneladas al año. No obstante, la producción fue decayendo a consecuencia del uso de fibras sintéticas y de la importación de yute de la India al país, por ser una fibra de bajo costo (Minagricultura, 2018).

Por otra parte, no se conoce el impacto ambiental en sí mismo generado por la producción de fique en el país. La información que se tiene hasta el momento solo abarca temas técnicos como material alternativo. Con la presente investigación se pudo identificar cuáles son esos impactos positivos y negativos que se generan durante la producción y proceso de cultivo del fique.

De manera que se generaron una serie de conclusiones que podrían aportar al desarrollo de futuras investigaciones con el fin de direccionarlas y así desarrollar estudios en donde se tiene actualmente ese vacío del conocimiento, que no ha permitido que las fibras de fique sean implementadas como material de refuerzo en concreto. Dichas conclusiones fueron generadas dando respuesta a las preguntas de investigación, que muestran las ventajas técnicas y ambientales que tiene el uso de fibras de fique vs. las fibras de PP, por medio de una tabla comparativa. De otro lado, se generaron las recomendaciones que surgieron de las conclusiones y del vacío del conocimiento que se identificó durante el desarrollo del estudio.

Con lo anterior, se pretende despertar el interés de la comunidad académica, a la que le competen los temas relacionados con materiales sostenibles para la industria de la construcción, y de esta forma avanzar en las investigaciones sobre fibras naturales como son las fibras de fique, ya que los resultados obtenidos hasta ahora, como se mencionó anteriormente, han sido positivos. Se requiere continuar con estudios que den respuesta a los diferentes interrogantes que han surgido para que estas puedan ser utilizadas en un futuro como material sustituto de las fibras sintéticas.

Planteamiento del problema

El planteamiento del problema fue desarrollado de acuerdo con los lineamientos de metodología de Hernández, Fernández, & Baptista (2014). La investigación fue desarrollada de manera inductiva. En este capítulo se presentan las preguntas y el objetivo central de la investigación, junto con los objetivos específicos que contribuyen con el desarrollo del objetivo principal, la justificación, la viabilidad y la evaluación de las deficiencias en el conocimiento del estudio.

Una de las industrias que genera afectaciones considerables al medio ambiente es el sector de la construcción. Las actividades de construcción impactan al medio ambiente durante todo el ciclo de vida del desarrollo del edificio (Acevedo et al., 2013). Dichos impactos ocurren desde el trabajo inicial en el sitio, durante el periodo de construcción, el periodo operativo, hasta la demolición final (Sikra, 2017).

Lo anterior, nos remite al agotamiento de recursos, y a la pérdida de la biodiversidad biológica debido a la extracción de materias primas, vertidos de residuos, calentamiento global, lluvia ácida y del smog, causado por las emisiones generadas por la fabricación de productos para la construcción.

Para Enshassi, Rizq y Kochendoerfer (2014), y Pertuz (2010), el 40% de los materiales extraídos de la naturaleza están estrechamente relacionados con la actividad de la construcción; con el 17% del consumo de agua, y el 25 % de la explotación de materia; con el consumo del 50% de la energía eléctrica que se produce, y el 50% de los combustibles fósiles. Por consiguiente, es importante introducir variables ambientales en la selección de materiales, considerando también los aspectos técnicos, con el fin de racionalizar los recursos para mitigar el impacto ambiental (Duran, 2017).

Inicialmente, se contextualizó con base en el uso de fibras de fique y fibras de polipropileno como material de refuerzo en concreto, ya que la información existente en fibras de fique es limitada comparada con investigaciones en fibras de sisal o yute.

Para ello, se llevó a cabo una revisión previa de investigaciones desarrolladas en fibras naturales en este campo de artículos y tesis de investigaciones publicadas por autores de países asiáticos como China, Indonesia, Pakistán, India, Bangladés y Arabia, y de países de Latinoamérica como Ecuador, Perú, Brasil, Costa Rica, Venezuela y Colombia. De esta forma, se pudo obtener más información sobre los estudios previos de las fibras naturales, con el fin de conocer el estado del conocimiento.

Del mismo modo, se contextualizó sobre las fibras de polipropileno, utilizadas como material de refuerzo en el concreto desde el año 2010 al año 2020, con base en artículos publicados por autores de países como Estados Unidos, Reino Unido y España, donde se identificaron las ventajas y desventajas técnicas y ambientales de las fibras de polipropileno, lo cual permitió establecer criterios para el análisis comparativo con la fibra de fique.

1.1 Justificación

De acuerdo con la estructura metodológica de Hernández et al. (2014), esta justificación plantea los criterios de conveniencia del estudio, implicaciones prácticas y valor teórico, como también, la viabilidad del estudio y la deficiencia del conocimiento, con el fin de evaluar la importancia de la investigación.

De modo que se contextualizó sobre la implementación de fibras de fique como posible material sustituto de las fibras de polipropileno en concreto fibroreforzado, y el estado del conocimiento en algunos países de Latinoamérica.

1.1.1 Conveniencia del uso de fibras de fique vs. fibras de polipropileno en el reforzamiento del concreto

Por medio de la revisión sistemática de literatura, se identificó que a la fecha en Colombia se tienen seis investigaciones en fibras de fique como material de refuerzo en concreto. Para esto, se realizó un protocolo de búsqueda con el fin de identificar la literatura existente

en el campo. Todas con aportes importantes, sin embargo, el que se destaca es el análisis de resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique desarrollado por Pinzón (2013), quien estudió la morfología y las propiedades mecánicas de la fibra de fique; elaboró muestras de concreto convencional y muestras de concreto con adición del 0.03% de fibras de fique de peso, con respecto al agregado fino como porcentaje óptimo, sin generar ningún impacto en la resistencia a la compresión, aunque sí generando un aumento en la resistencia a la flexión.

Como conclusión, la investigación estableció el porcentaje óptimo de fibras de fique en el concreto y realizó recomendaciones acerca de los posibles usos de los concretos reforzados con dichas fibras, tal como la construcción de losas y vigas con longitudes no mayores a 3 metros (Pinzón, 2013).

Tabla 0.1 Investigaciones en fibras de fique como material de construcción en Colombia

Tipo Investigación	Año	Título	Fuente
Tesis	2017	Mejora de las condiciones de durabilidad de la fibra de fique como elemento reforzante del concreto.	(Jaramillo, 2017)
Tesis	2016	Determinación del comportamiento mecánico de un concreto adicionado con fibra de fique a partir de su resistencia a la tracción, flexión y compresión.	(Pinto & Figueroa, 2016)
Tesis	2015	Caracterización mecánica del concreto reforzado con fibra de fique modificando la matriz cementicias con aditivos a base de humo de sílice	(Barbosa & Mayorga, 2015)
Artículo	2014	Evaluación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos a base de fibra de fique y fibras sintéticas.	(Pérez Gracia, 2014)
Artículo	2013	Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique	(Pinzón, 2013)
Tesis	2011	Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (Fibra de fique)	(Bohórquez, 2011)

Fuente: Autor (2020).

Las fibras de fique presentan propiedades físicas y mecánicas que mejoran las propiedades del concreto en su resistencia a flexión y disminuyen la fisuración en comparación con el concreto simple (Pinto & Figueroa, 2016).

Dichas fibras son una alternativa realmente llamativa para aplicaciones industriales por su bajo costo, peso ligero, y por ser materia prima renovable con propiedades superiores a otros materiales, cuando se utilizan como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica (Jaramillo, 2017).

El fique es una fibra de fácil acceso que se produce en grandes cantidades en Colombia, de tal modo que se cuenta con un material viable para ser aplicado en concreto fibroreforzado con potencialidades para reemplazar el uso de fibras de polipropileno, a partir de la necesidad ambiental de utilizar materiales sostenibles.

Por otro lado, de la revisión de literatura desarrollada en este estudio, surgen interrogantes acerca de la posibilidad de producir fibras de fique en grandes cantidades, con el fin de que estas sean aplicadas en el reforzamiento del concreto, desde el punto de vista sostenible, con base en el ciclo de vida del material en cada una de sus etapas. Un asunto que podría considerarse como otro tema de investigación, ya que no es este el propósito de la presente investigación.

En cuanto a las fibras de PP, por medio de la revisión de literatura, se identificó que su implementación como refuerzo en concreto se ha observado desde los años 60, cuando la División de Desarrollo de la Armada de los Estados Unidos las consideró el material sintético más apropiado para el concreto, tanto desde un punto de vista económico como de desempeño (Vidaud et al., 2015), y que permitió identificar que se tiene una gran ventaja en investigaciones con fibras de polipropileno.

Hasta el momento se tienen 504 artículos de investigación específicamente en fibras de polipropileno como refuerzo en concreto en bases de datos como Scopus, ScienceDirect, ASCEILibrary, SciElo, Google.

1.1.2 Uso racional de fibras sintéticas y naturales para el reforzamiento del concreto

En la actualidad, el uso racional de materiales se ha convertido en una obligación como consecuencia de la necesidad de mitigar el impacto ambiental con la implementación de materiales amigables con el medio ambiente.

Debido a la creciente utilidad del concreto como material de construcción, el mayor desafío es mejorar la calidad de la construcción, ya que las materias primas utilizadas están afectando al medio ambiente de manera cada vez más considerable. (Kubair & Rama, 2020). Es por esto, que se consideró importante en esta investigación evaluar la posibilidad

de mitigar el impacto ambiental que generan los recursos utilizados en el concreto, por medio del reemplazo de las fibras sintéticas por el uso de fibras naturales.

En efecto, es importante continuar con el desarrollo de investigaciones en fibras de fique como recurso renovable que generen un nuevo conocimiento y aporte a la consolidación del material, para su aplicación en el mejoramiento de las propiedades del concreto.

A pesar de que las fibras de polipropileno son de muy bajo costo en comparación con otras fibras artificiales, como consecuencia de los bajos precios del petróleo, las primeras están hechas de materiales no renovables, y sintetizadas a partir de derivados del petróleo, como sucede con las fibras acrílicas que utilizan acrilonitrilo y disolventes como el dimetilformamida, fluoro carbonos, poliamidas, poliéster polietileno, cloro fibras. De allí, los efectos del agotamiento de recursos no renovables, el invernadero y la lluvia ácida, sin dejar de lado aquellas sustancias que contienen cloro, y que provocan la destrucción de la capa de ozono (Tuozzo, 2017).

En la actualidad, se tienen estudios que determinan los impactos ambientales generados durante el proceso de fabricación de las fibras de polipropileno. Un estudio desarrollado por Mannheim & Simenfalvy (2020) determina los impactos ambientales de la fabricación del polipropileno, asociados a las actividades realizadas en el proceso de creación, así como la afectación de la vegetación, la deforestación, y la pérdida de la biodiversidad; la alteración de las características microbiológicas del agua, la contaminación por sustancias químicas, y la generación de residuos sólidos, entre otros aspectos relacionados con la perforación de pozos, siendo este último, la actividad principal para la extracción de la materia prima necesaria para la creación de dicha fibra (Vargas, 2020).

Por lo anterior, se consideró necesario cuantificar los impactos ambientales de las fibras de PP en cada una de las etapas de manufactura del polipropileno, con el fin de compararlas ambientalmente con las fibras de fique como material alternativo sostenible, el cual también fue necesario evaluar de la misma manera.

Con los datos obtenidos de la revisión de literatura, referenciada a lo largo del desarrollo de la investigación, se identificó una oportunidad de aporte al conocimiento en el sector de las fibras de fique, como material alternativo en el reforzamiento del concreto en la industria

de la construcción. Y se trata de un campo a investigar (ya que aún no se ha consolidado su aplicación en el concreto) debido a la falta del desarrollo de investigaciones sobre dichas fibras para su aplicación. Es decir, su implementación como material ecológico y renovable (Bohórquez, 2011), considerando el uso racional de la materia prima, con base en los principios ecológicos como la conservación de recursos, la reutilización y el fácil acceso a los recursos, y la utilización de recursos reciclables y renovables, que generen materiales biodegradables. Todo ello, desde las consideraciones respecto a la gestión del ciclo de vida de las materias primas utilizadas con lo correspondiente en cuanto a la reducción de energía, disminución de residuos y emisiones (Ramírez & Arango, 2014).

Cabe aclarar que, de acuerdo con la revisión de literatura desarrollada, no se encontraron estudios del uso de fibras de PP, fabricadas a partir de polipropileno reciclado que permitan conocer si los impactos generados son positivos o amigables ambientalmente.

1.1.3 Implicaciones practicas del uso de fibras de fique vs. fibras de polipropileno para el reforzamiento del concreto

El concreto es uno de los materiales con mayor uso en la industria de la construcción (Ceballos, 2016), debido a su alta resistencia a la compresión, sus propiedades mecánicas, dureza, manejabilidad a la aplicación, pero con desventajas en su comportamiento a la flexión, debido a que posee limitaciones como son su alta fragilidad; la baja capacidad de deformación o arqueamiento ante fisuras, y rompimiento en las vigas (Terreros & Carvajal, 2016). De modo que se presenta como una opción utilizada actualmente para eliminar dichas debilidades es la inclusión de fibras sintéticas como las fibras de polipropileno (Vairagade & Kene, 2013).

El polipropileno es un material muy resistente a la degradación y necesita muchos años para degradarse. Dada su alta resistencia a la degradación, la única forma de disminuir su crecimiento como residuo es el reciclado. Para el reciclaje del polipropileno existen dos técnicas: el reciclado químico y el mecánico (Twenergy, 2019). Sin embargo, al reciclar el polipropileno se afectan las propiedades mecánicas del mismo, por lo cual se deben adicionar aditivos para restituir sus propiedades (Bueno, 2012).

Aunque existen estudios que determinan los impactos ambientales ocasionados por las fibras de polipropileno, es claro que la materia prima para crear dichas fibras proviene de

recursos no renovables como el petróleo, el cual genera deforestación, afectación de la vegetación, pérdida de la biodiversidad, alteración de las características microbiológicas del agua, contaminación por sustancias químicas, entre otros efectos, a causa de la perforación de pozos para la extracción de la materia prima (Vargas, 2020).

De tal forma que, como consecuencia de los impactos ambientales negativos que se conocen hasta ahora, es necesario implementar fibras naturales renovables como la fibra de fique, con el fin de contribuir con la mitigación de dichos impactos ambientales.

Por otra parte, los estudios con fibras de fique en concreto fibroreforzado han generado resultados favorables en cuanto al comportamiento a la flexión y a la retracción plástica, según Bohórquez (2011), Pinzón (2013) y Pinto y Figueroa (2016). Sin embargo, en las conclusiones de dichas investigaciones se coincidió en que aún se requieren mayores investigaciones para consolidar la aplicación de dichas fibras, aunque no se descarte su aplicación como material alternativo en el reforzamiento del concreto.

En efecto, Pinzón (2013), identificó en su investigación que las fibras de fique son óptimas como material de refuerzo en la construcción de losas en concreto y vigas con longitudes no mayores a 3 metros, lo cual indica que con los pocos estudios que se tienen actualmente, se identificaron dos posibles aplicaciones de dichas fibras en la industria de la construcción.

Para determinar la viabilidad ambiental de la fibra de fique como material sostenible, fue necesario evaluarla ambientalmente en la fase de “la cuna a la puerta” de lo cual no se tiene información, lo que permitiría beneficiar el estado del conocimiento del uso de fibras de fique como material de refuerzo en concreto para futuras investigaciones.

1.1.4 Avances de investigaciones en fibras naturales aplicadas en el reforzamiento del concreto en algunos países de Latinoamérica

Actualmente, Colombia es el único país de Latinoamérica que ha desarrollado investigaciones con fibras de fique como material de refuerzo en concreto con 6 investigaciones con aportes significativos. Sin embargo, con la revisión de literatura se identificó que autores como Bohórquez, (2011) y Pinto & Figueroa, (2016), concluyen que se requieren mayores investigaciones acerca de la durabilidad del material, tratamiento,

dosificación, tamaño y forma de las fibras, entre otros aspectos. Dichas investigaciones surgieron como interrogantes que deben ser resueltos, y que coinciden con los interrogantes que otros investigadores como Terreros & Carvajal, (2016) y Bejarano, (2019), quienes concluyeron a partir de resultados de investigación sobre otras fibras naturales como material de refuerzo en concreto.

De otro lado, por medio de la revisión de literatura en fibras naturales, se identificó que existen avances significativos en cuanto a su aplicación como material de refuerzo en concreto, en algunos países de Latinoamérica como Brasil, Ecuador, Costa Rica, Perú, Nicaragua y Venezuela.

Pese a lo anterior, aún no se ha consolidado la aplicación en el mejoramiento de las propiedades del concreto en cuanto a la resistencia a flexión y disminución de fisuras en estado fresco antes de las 24 horas, posiblemente debido a la falta de respuesta de los interrogantes que deben ser resueltos para conocer cómo mejorar la durabilidad: identificar longitudes, dosificación y tratamientos óptimos que mejoren las propiedades de la fibra, de tal manera que se demandan resultados confiables para su aplicación según autores como Espinoza (2015), Paricaguán (2015), A. Silva (2017) y (Lara Auersvaldt et al., 2019).

1.1.5 Valor teórico de la investigación

En la actualidad, existe un estudio comparativo sobre las fibras de sisal y las fibras de polipropileno desarrollado por Castoldi, Silva de Suaza y Andrade (2019), de Brasil, quienes identificaron que es posible el reemplazo de fibras de polipropileno por fibras de sisal, pues las fibras de sisal proporcionan el mismo nivel de resistencia residual que las fibras de polipropileno. Así mismo, concluyen que el uso de dichas fibras como refuerzo en el concreto es viable desde el punto de vista mecánico, en relación con su durabilidad, teniendo en cuenta la necesidad de mayores dosis y uso de una matriz adecuada (Castoldi, Silva de Souza, & Silva, 2019).

De acuerdo con la revisión de literatura, se identifica que en este momento no se conoce si la fibra de fique es un material potencial como sustituto de las fibras de polipropileno. Hasta ahora, los investigadores solo han comprobado que la fibra de fique aporta propiedades que benefician la resistencia a flexión y disminuye la aparición de fisuras en el concreto, mas no se tiene un comparativo técnico y ambiental entre dicha fibra y la fibra

de polipropileno. De manera que, surge el interés de la autora en conocer si la fibra de fique, al ser un recurso renovable, es amigable ambientalmente como material adicionado en concretos.

Por otra parte, se han obtenido avances significativos en investigaciones en fibras naturales como material de refuerzo en concreto, ya que las fibras como el sisal, fique, yute, bagazo de caña y el coco proporcionan beneficios para el mejoramiento de las propiedades del concreto en la resistencia a flexión y reducción de la retracción plástica.

De manera que, con el desarrollo de la investigación, se contribuirá con el aporte al desarrollo de materiales alternativos que generen menor impacto ambiental, como sucede posiblemente con las fibras de fique en la industria de la construcción.

1.1.6 Viabilidad de la investigación

El fique tiene su origen en la América tropical, sobre todo en las regiones andinas de Colombia, Venezuela y Ecuador, donde prevalecen condiciones tropicales durante casi todo el año. Como punto a destacar, se tiene que Colombia es el mayor productor mundial de fique, como productor de cerca de treinta mil toneladas, anualmente. Venezuela, Ecuador y Costa Rica también la cultivan comercialmente, pero su producción estimada no supera las mil toneladas al año en cada país (Agronet, 2015).

De tal forma, que se vislumbra una oportunidad local para el uso de fibras de fique como material de refuerzo en concreto, aunque no está consolidada su aplicación como las fibras de polipropileno adicionadas en concreto fibroreforzado.

El uso de fibras de polipropileno, por su parte, ya se encuentra estandarizado, a pesar de que estas presentan algunas desventajas, al ser hidrófobas, y, por lo tanto, tener pobres características de adherencia con la matriz de cemento, un bajo punto de fusión, alta combustibilidad, y un módulo de elasticidad relativamente bajo (González, 2010).

Además de la necesidad ambiental que se tiene de crear materiales sostenibles, es así como se abre una puerta para el uso de fibras de fique como material sustituto en el reforzamiento del concreto, en caso tal de que estas sean viables ambientalmente.

Así mismo, las fibras de fique son una alternativa realmente llamativa para aplicaciones industriales por su bajo costo, peso ligero y por ser materia prima renovable con propiedades superiores a otros materiales, cuando se utiliza como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica (Jaramillo, 2017). La fibra de fique aporta mejoras en las propiedades mecánicas del concreto. Esta puede reducir la porosidad en la estructura del concreto, y, al mismo tiempo retrasar y prevenir la propagación de fisuras, además, del mejoramiento de su resistencia a flexión (Pinto & Figueroa, 2016).

Como se mencionó anteriormente, los investigadores consideran que aún no se ha consolidado la aplicación de las fibras de fique en el reforzamiento del concreto, debido a que es necesario desarrollar mayores investigaciones acerca de la fibra como material individual y como material aplicado en concreto fibroreforzado. Los materiales de fibra natural están altamente disponibles y tienen buen contacto interfacial, debido a su superficie rugosa. Por lo tanto, proporcionan ventajas únicas para mejorar las propiedades del concreto de alta resistencia, pero quebradizo (Zhang et al., 2020).

1.1.7 Beneficios del uso de fibras de polipropileno en el reforzamiento del concreto

En los últimos años, se han realizado estudios que evalúan las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de polipropileno, con adición de fibras con porcentajes entre 0.1% y 10% del volumen, en los que se han evidenciado resultados contradictorios respecto a los efectos de las fibras de polipropileno en la resistencia a compresión y flexión en el concreto.

El uso de fibras de polipropileno es un medio eficaz para mejorar la resistencia al agrietamiento del concreto. En la práctica este material es utilizado normalmente, ya que la resistencia a temprana edad del concreto es mejorada por medio de la adición de fibras plásticas de polipropileno, que también se ven afectadas por la longitud de las fibras. Lo cual conduce a que los investigadores desarrollen mayores investigaciones que puedan mitigar dichas desventajas (Xu et al., 2020).

Una investigación desarrollada por Mendoza, Aire & Dávila (2011), establece que la presencia de fibras de polipropileno en el concreto presenta efectos negativos en la

resistencia a compresión, pese a que se alcanza un ligero incremento en la resistencia a flexión cuando el contenido de fibras es ligeramente alto. Sin embargo, un porcentaje mayor de fibras en el concreto afecta la trabajabilidad de la mezcla (Mendoza et al., 2011).

1.1.8 Beneficio del uso de fibras naturales como el fique para el reforzamiento del concreto.

En general, en cuanto a las fibras naturales, los investigadores han obtenido resultados positivos acerca de los beneficios que aporta la aplicación de las fibras como el sisal, cáñamo, bagazo de caña, la fibra de coco, el fique, entre otras. Sin embargo, una de las fibras que ha relucido en comparación con las otras fibras naturales actualmente estudiadas, es la fibra de yute en países asiáticos, y en Colombia la fibra de fique. No obstante, la fibra de fique aún no ha sido aprovechada de la mejor forma, debido a la falta de investigaciones para la obtención de resultados precisos (Carvajal & Terreros, 2016).

Es preciso destacar que las fibras naturales se derivan de recursos renovables, no requieren de energía para ser procesadas y son biodegradables. Así mismo, es importante conocer sus posibles ventajas en cuanto a costos y, por lo tanto, evaluarlas como material de potencial para reemplazar un gran segmento de las fibras sintéticas, como las fibras de polipropileno en numerosas aplicaciones (Begum K & Islam MA, 2013).

No obstante, un estudio comparativo del comportamiento mecánico y de durabilidad del concreto reforzado con fibras de polipropileno y fibras de sisal, desarrollado en Brasil, por (Castoldi et al., 2019), evidencia que la fibra de sisal proporciona el mismo nivel de resistencia residual que la fibra de polipropileno, siempre y cuando se considere la equivalencia de las dosis de cada una.

Dicha investigación concluye que la fibra de sisal es viable técnicamente. Sin embargo, en cuanto a su durabilidad, es posible mejorarla teniendo en cuenta la necesidad de una mayor dosis. Pese a que se tienen resultados favorables, no se ha consolidado su aplicación, debido a que es necesario evaluar y predecir el comportamiento mecánico del concreto adicionado con fibras naturales. Además, estas fibras presentan baja resistencia en ambientes alcalinos, como matriz del concreto. Este hecho es considerado una barrera para el uso de dichas fibras en aplicaciones a gran escala (Castoldi et al., 2019).

1.1.9 Deficiencia del conocimiento del problema de investigación

La deficiencia del conocimiento se encuentra en el desconocimiento de las posibilidades del uso de fibras de fique como material de refuerzo en concreto, ya que actualmente solo se cuenta con seis investigaciones. Estas investigaciones concluyen que las fibras de fique son viables técnicamente, mas no se conoce su viabilidad ambiental.

Con el fin de evaluar la viabilidad técnica y ambiental, se consideró necesario desarrollar un comparativo entre las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno, con el fin de cubrir ese vacío del conocimiento.

De otro lado, por medio del análisis de la revisión de literatura, se evidenció que una de las fibras colombianas con mayor potencial, debido a su composición química y sus propiedades mecánicas, es la fibra de fique proveniente de una fuente renovable. Así mismo, se identificó que los investigadores aún no han considerado evaluar su viabilidad ambiental. Por ello, se evidenció el vacío del conocimiento, en lo que respecta a identificar la viabilidad ambiental de dicha fibra comparada con la fibra de polipropileno que es la normalmente utilizada, y así determinar si es viable o no su aplicación.

Por lo anterior, surge la necesidad de motivar la implementación de fibras naturales en la sustitución de fibras sintéticas en la industria de la construcción, debido a la necesidad ambiental del uso de recursos renovables, y a las pocas investigaciones que se han desarrollado en Colombia en dicho campo. Motivar el desarrollo de materiales de construcción amigables ambientalmente, que es la clara finalidad de la presente investigación que busca incentivar a los investigadores a realizar estudios en fibras naturales como materia prima, permitiría la apertura a otros posibles usos. Además, las fibras naturales como las fibras de fique tienen muchas ventajas, ya que aportan al mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto, que promueven el reemplazo de las fibras sintéticas.

Con la revisión de literatura, se identificaron resultados positivos obtenidos por los investigadores en fibras de fique en Colombia. La adición de fibras de fique en el concreto contribuye al mejoramiento de sus propiedades mecánicas como es su resistencia a flexión, y disminuye la aparición de fisuras, aunque dichas propiedades también se ven afectadas por la presencia del cemento, el cual es el principal componente de la mezcla

del concreto. De allí, que se recomienda desarrollar investigaciones para encontrar aditivos o tratamientos químicos que permitan modificar la matriz cementicia, con el fin de evitar la pérdida de las propiedades de la fibra de fique, y así aumentar las características mecánicas del concreto (Pinto & Figueroa, 2016).

Si bien, los investigadores como Pinto y Figueroa (2016) y Jaramillo (2017) consideran que todavía no se conoce cuál es el tiempo de durabilidad de las fibras tratadas y no tratadas, como material adicionado o como material individual, tampoco se conoce la durabilidad del concreto con adición de fibras de fique, y no se tienen parámetros establecidos en cuanto a su dosificación, tamaño y forma, de modo que los investigadores sugieren desarrollar los siguientes estudios:

- ✓ Durabilidad de la fibra de fique no tratada.
- ✓ Durabilidad del concreto reforzado con fibras de fique cuando está expuesto a diversas condiciones en ambiente natural, para correlacionar dicho resultado con los valores obtenidos en los ensayos mecánicos.
- ✓ Durabilidad de la fibra de fique tratada químicamente.
- ✓ Investigaciones del comportamiento mecánico del concreto con adición de fibras de fique en diferentes longitudes, porcentajes de adición y relación agua/cemento, para determinar valores ideales y obtener una mezcla que cumpla con los requerimientos técnicos y normativos.

Por consiguiente, dichos factores deben ser resueltos y estandarizados para poder determinar la aplicación de las fibras de fique como material de refuerzo en concretos.

1.2 Preguntas de Investigación

Como complemento a los objetivos de investigación se plantearon las preguntas de investigación a responder para lograr los objetivos del estudio (Hernández et al., 2014).

Para analizar las propiedades físico-mecánicas de la fibra de fique aplicada en el reforzamiento del concreto, y desarrollar el análisis comparativo entre dicha fibra y la fibra de polipropileno, se formularon las siguientes preguntas:

La primera pregunta surge de la ausencia de investigaciones acerca de la viabilidad ambiental del uso de fibras de fique como material de refuerzo en concreto.

¿Cuál es la viabilidad ambiental y técnica del uso de fibras de fique como material alternativo vs. la fibra de polipropileno aplicada en el reforzamiento del concreto?

Las fibras de polipropileno ya tienen establecidas sus propiedades físicas y mecánicas que aportan al mejoramiento de las propiedades del concreto. De modo que, para comparar las fibras de fique con las fibras de polipropileno, es necesario conocer cuáles son esas propiedades físicas y mecánicas que hacen de la fibra de fique un material potencial como sustituto de las fibras de polipropileno.

¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de fique como material potencial para el reforzamiento del concreto?

Existen diferentes estudios acerca de los impactos ambientales en todas las etapas del ciclo de vida de las fibras de polipropileno (PP), con distintos resultados de emisiones de CO₂. Por tanto, surge el interés particular de la autora en comparar dichos impactos que generan las fibras de PP como material en la industria de la construcción, tomando los datos de la revisión de literatura para el inventario del análisis de ciclo de vida (ACV), y así comparar los resultados del ACV con los resultados de otros investigadores como Korol, Hejna, Burchart y Wachowicz (2020), Castaño y Botero (2017), Lee y Pereira (2011), entre otros. Dichos datos serán confrontados con los resultados del ACV de esta investigación, y los datos de otros autores, con el fin de dar respuesta a la pregunta de investigación.

¿Cuáles son los impactos ambientales positivos y negativos que generan las fibras de polipropileno en la etapa de “la cuna a la puerta”?

1.3 Objetivos

Para dar respuesta a las preguntas de investigación se establecieron unos objetivos que permitieron direccionar el estudio, los cuales surgieron de la revisión de literatura existente, donde se identificó que no existen estudios que determinen la viabilidad ambiental y técnica entre la fibra de fique vs. la fibra de polipropileno. Así mismo, para establecer las ventajas y desventajas de una frente a la otra como resultado de los objetivos de investigación.

A partir de las conclusiones obtenidas de la bibliografía existente y del ACV desarrollado, es posible generar las discusiones del estudio que permitan confrontar y evaluar la confiabilidad de los resultados o respuestas a los objetivos de la investigación, generando de esta manera las conclusiones y recomendaciones que dieran lugar.

1.3.1 Objetivo general

Determinar impactos ambientales positivos y negativos que se pueden asociar al uso de la fibra de fique como material de refuerzo en el concreto, al compararlos con los impactos que surjan del uso de fibras de polipropileno, estableciendo las ventajas y desventajas técnicas y ambientales de una frente a la otra.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar la viabilidad técnica y ambiental de la fibra de fique aplicada como material de refuerzo en el concreto.
- ✓ Identificar ventajas o desventajas técnicas de las fibras de fique como material de refuerzo en concreto.
- ✓ Determinar el impacto ambiental en la fase de la cuna a la puerta, de las fibras de fique y fibras de polipropileno.

Marco teórico

Para el desarrollo de la perspectiva teórica, fue necesario exponer y analizar las teorías existentes en cuanto a fibras de fique y fibras de polipropileno, conceptualizaciones, investigaciones previas y los antecedentes en general que se consideraron válidos para encuadrar el estudio (Hernández et al., 2014). De manera que, para cumplir con el objetivo general de la investigación, fue necesaria la inmersión en el conocimiento existente, identificando el sumario del tema y los hallazgos más importantes.

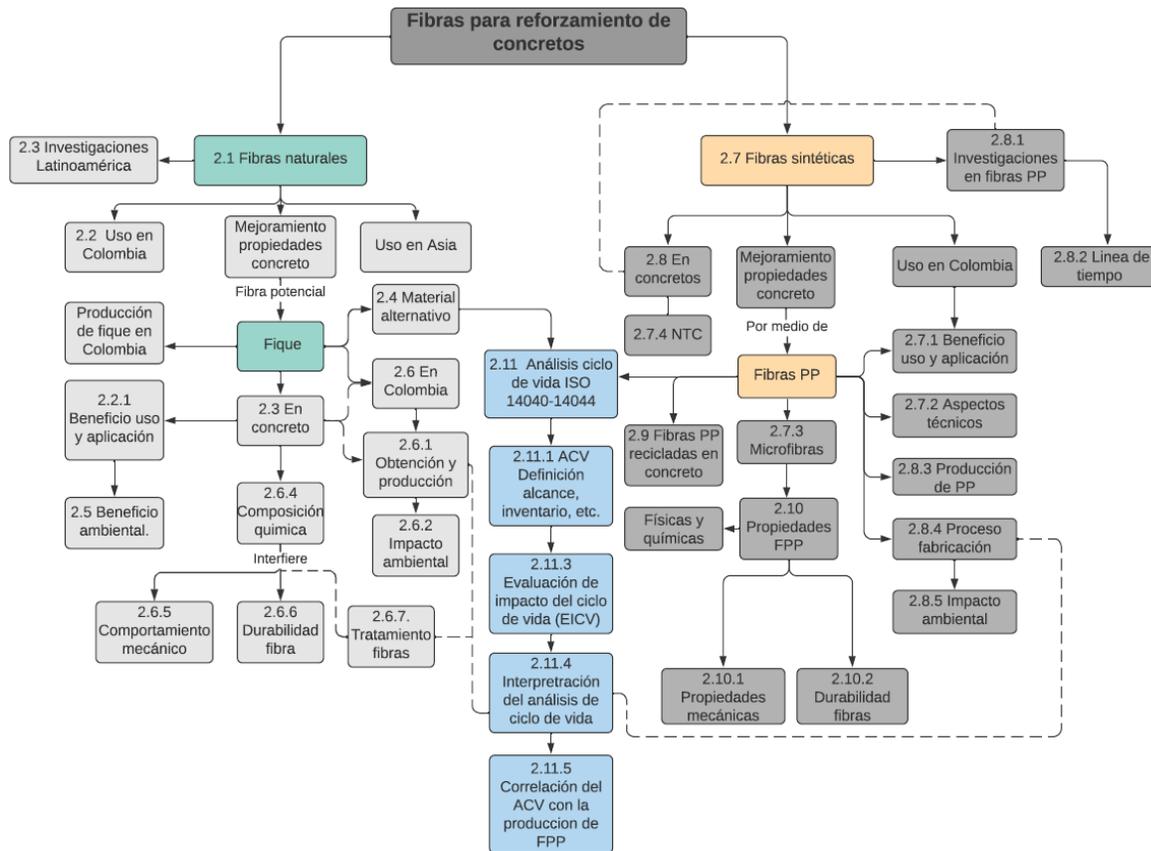
Con el fin de establecer los criterios técnicos del análisis comparativo entre las fibras de fique y polipropileno, se tomó como base la literatura existente en cuanto a las fibras mencionadas, implementadas como material de refuerzo en concreto, identificando las propiedades físicas y mecánicas, su proceso de obtención y fabricación de cada una de ellas.

Por otra parte, fue necesario contextualizar y establecer criterios ambientales, de acuerdo con la ISO 14040:2007, para desarrollar el análisis de ciclo de vida (ACV) de las fibras, como material de refuerzo en concreto, de modo que fue ineludible conocer el impacto ambiental en la etapa de “la cuna a la puerta” de cada una de las fibras, teniendo en cuenta las cuatro fases (objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto ambiental e interpretación) del estudio del ACV de dichas fibras.

De otro lado, el método desarrollado para construir y organizar la información planteada en el marco teórico fue mediante el apoyo de un mapa de literatura desarrollado en dos ejes, uno en fibras naturales y dos en fibras sintéticas, con base en una contextualización en cuanto al uso de estas fibras en Colombia, investigaciones en fibras naturales en Asia y Latinoamérica, la identificación de las propiedades físicas y mecánicas de las fibras, al igual que su comportamiento mecánico como material adicionado, con base en la contextualización del proceso de fabricación de cada una de las fibras y contextualización,

según la norma ISO 14040 (2007) para el desarrollo del análisis comparativo entre las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno.

Figura 0-1. Diagrama de flujo mapa de literatura



Fuente: Autor (2020).

1.4 Fibras naturales como material en la industria de la construcción en Colombia

Sus inicios surgieron desde el siglo XVI con la implementación de la paja en la construcción de muros en bahareque (L. Silva et al., 2018). Sin embargo, se tienen diversidades de fibras naturales en el país, como la fibra de fique que ha sido investigada como material sostenible de refuerzo en concreto, a pesar de no haber sido consolidada su aplicación.

Las fibras naturales han sido implementadas como material en la construcción desde el siglo XVI, esto de acuerdo con Corradine (1989), y por la evidencia que se conserva de edificaciones construidas en este periodo en la zona andina del país. Datos que permiten establecer el uso y aplicación de técnicas y sistemas de construcción, asociados con el del bahareque, el adobe y la tapia pisada.

La construcción en Bahareque tradicional consiste en una estructura de madera y/o bambú revestida con una matriz de bambú partida o abierta (conocida como esterilla), caña, ramitas o tiras de madera, que finalmente se enyesa en estiércol o tierra con paja para mayor resistencia. Normalmente, se eleva sobre una plataforma de piedra o ladrillo para reducir el riesgo de humedad (Kaminski et al., 2018). Las viviendas en bahareque se pueden encontrar en todo el mundo, con diferencias en los materiales vegetales, los cuales dependen de cada región. En Colombia, en Cundinamarca, por ejemplo, se utiliza el chusque, mientras que Antioquia usa la caña brava y en el antiguo Caldas, la guadua (Montoya et al., 2005).

En los últimos años, las fibras sintéticas han ganado popularidad como una opción práctica para el control del agrietamiento por contracción plástica, debido al aumento de la tenacidad y la resistencia al impacto. Una de estas son las fibras de polipropileno, las cuales adicionadas al concreto permiten controlar el agrietamiento por contracción plástica que ocurre durante las seis horas posteriores a la colocación del concreto (Mendoza et al., 2011). Estas fibras tienen una alta resistencia química a los ácidos minerales, las sales inorgánicas, y también se pueden utilizar para mejorar las características duraderas del concreto.

Por consiguiente, la adición de fibras en la mezcla del concreto puede mejorar la tenacidad, la resistencia al impacto, la resistencia a la tracción a largo plazo, y a la erosión abrasiva; resistencia al fuego y comportamiento posterior al agrietamiento mientras que puede reducir la contracción plástica, así como disminuir la propagación de las fisuras y la tenacidad a la fractura (Ramezani pour et al., 2013).

1.5 Fibras naturales como material de refuerzo en concreto en Colombia

En Colombia se han desarrollado investigaciones del uso de la fibra de fique, cáñamo, fibra de plátano y de coco como refuerzo en el concreto, obteniendo resultados positivos en cuanto a su aplicación. Sin embargo, aún no se ha formalizado su implementación en concretos debido a la falta de conocimiento que existe acerca del tema.

Una investigación desarrollada por Luis Terreros e Iván Carvajal (2016), acerca de la utilización de la fibra de cáñamo para el reforzamiento del concreto con base en ensayos técnicos, afirma que dicha fibra en el concreto ayuda principalmente a evitar el agrietamiento, y a un mejor aglutinamiento de los materiales para que al momento de la rotura, tanto a la compresión como a la flexión, el concreto permanezca unido. A causa de esto, se concluyó que tiene una buena adherencia de la fibra a la matriz (Terreros & Carvajal, 2016).

De otro lado, el grupo de investigación en procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos de la Universidad Nacional, sede Manizales, desarrolló una investigación acerca de la implementación de la fibra de plátano en el concreto, concluyendo que la resistencia, flexión y durabilidad mejoran las propiedades del cemento al adicionarse fibra de plátano y banano, previamente recubierto por óxido de manganeso. Dicho recubrimiento mejora las propiedades de resistencia a la compresión de materiales como el cemento celulósico, utilizado en la industria de la construcción (El Espectador, 2015).

Por lo anterior, se concluye que estas fibras naturales aportan beneficios que deberían ser estudiados para poder implementarlas en un futuro como material adicionado en cemento o concretos.

Las fibras naturales como el pasto, fique, junco y pelo animal han sido tradicionalmente agregados del adobe para reducir su tendencia a la fisuración y mejorar el desempeño del material a esfuerzos de tensión. Las introducciones de dichos agregados de forma específica permiten una resistencia a la tracción superior a la matriz en que estos materiales están embebidos, aportando cualidades adicionales que no alcanzarían sin refuerzos como el adobe, el yeso, la cerámica o el concreto. Durante los últimos cincuenta años, el empleo y estudio de las fibras en la construcción han conducido el desarrollo y la

fabricación de tipos específicos de fibras como la fibra de vidrio, el polipropileno y polivinilos, entre otros (ICONTEC, 2007).

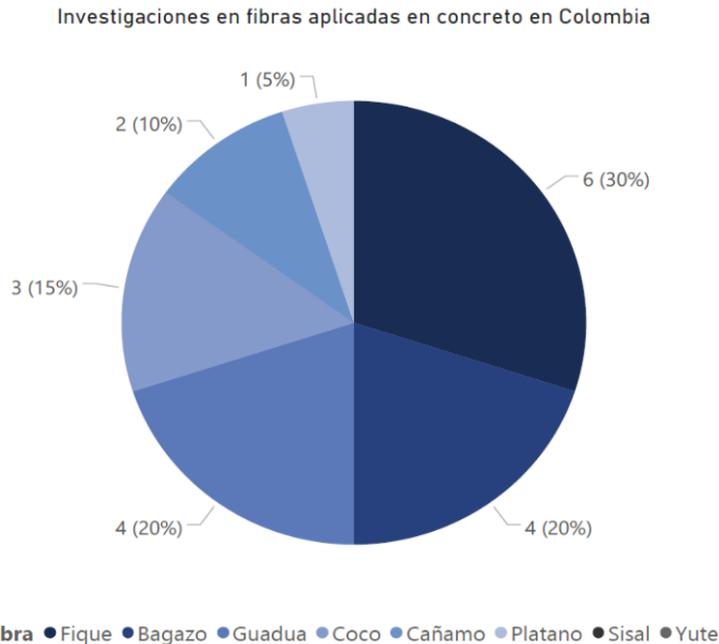
De acuerdo con el análisis de literatura, se evidencia que los investigadores consideran que los materiales reforzados con fibras naturales se pueden obtener a un bajo costo, usando la mano de obra disponible en la localidad y las técnicas adecuadas para su obtención. Dichas fibras son llamadas fibras naturales no procesadas.

Las fibras naturales pueden ser procesadas químicamente para mejorar sus propiedades. Generalmente, estas fibras son procesadas de la madera. Y aunque históricamente muchas fibras han sido usadas para reforzar varios materiales de construcción, ha sido desde hace unos pocos años que los investigadores se han dedicado a estudiar las fibras naturales como refuerzo (Lucena, Suárez y Zamudio, 2009). De hecho, las fibras naturales están disponibles razonablemente en grandes cantidades en muchos países en desarrollo y representan una fuente renovable continua.

Colombia es un país que posee abundante producción de fibras naturales como la fibra de fique, plátano coco y fibra de bagazo de caña, las cuales se encuentran en diferentes regiones del país (Artesanías de Colombia, 2014). Aun así, no se les ha dado el valor que estas tienen a causa de su potencial como material alternativo (BanRep, 2012).

A continuación, en la figura 2-2, se muestra el número de investigaciones identificadas en fibras naturales aplicadas como material de refuerzo en concreto en Colombia, evidenciando la fibra de fique con mayores estudios, seguido la fibra de guadua, bagazo de caña, fibra de coco, cáñamo y fibra de plátano.

Figura 0-2. Investigaciones desarrolladas en fibras naturales aplicadas al concreto en Colombia.



Fuente: Autor. Información tomada de Scopus (2020), Google Scholar (2020).

Como complemento para anexar en este campo del uso de fibras naturales en concretos en Colombia, se tiene información para investigaciones futuras, las cuales están registradas en las tablas 1, 3 y 4 de los anexos.

1.6 Beneficio uso y aplicaciones de las fibras naturales en la industria de la construcción en Colombia

Actualmente, las fibras naturales como la fibra de madera hecha de retazos reciclados son utilizadas como material aislante térmico y acústico. Las fibras de cáñamo se utilizan en paneles flexibles, utilizados en construcción para la instalación de paredes, suelos y techos, y las fibras de coco son utilizadas como aislante térmico y acústico en la industria de la construcción en Colombia (Castro, 2017). No obstante, como se mencionó anteriormente, no se ha estandarizado el uso de fibras naturales en concreto en Colombia. Actualmente, solo existen estudios con algunas recomendaciones y sugerencias de investigaciones que requieren ser desarrollados.

Además, es importante tener en cuenta que se trata de un material local, aspecto a considerar en cuanto podría ser más rentable y estar al alcance. El promover el uso de materiales cementosos reforzados con fibras naturales, podría ser una forma de lograr construcciones sostenibles (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010)

A causa de esto, se realizó una revisión de literatura de las aplicaciones de fibras naturales, como las fibras de cáñamo, plátano, yute, sisal, fibra de coco, bambú y fibra de bagazo de caña a nivel general o mundial, identificándose las fibras con mayor aplicación y propiedades destacadas como es el caso de la fibra de cáñamo, seguida de la fibra de yute y sisal, siendo estas las más utilizadas en diferentes industrias como el sector automotor, en lo que respecta a los materiales compuestos; la industria textil, y la industria de la construcción, aplicadas en concreto como material de refuerzo (no estandarizado hasta ahora), así como la fibra de cáñamo como material aislante en mampostería (Velásquez et al., 2016).

Tabla 0.1 Fibras con mayor aplicación en los diferentes tipos de industria.

Tabla de aplicaciones	Industria textil	Concreto	Aislantes	Mampostería	Material compuesto Ind. automotriz
Cáñamo	●	●	●	●	●
Yute	●	●	●	●	●
Sisal	●	●	●	●	●
Plátano	●	●	●	●	●
Coco	●	●	●	●	●
Bambú	●	●	●	●	●
Bagazo de caña	●	●	●	●	●
Lino	●	●	●	●	●

● Frecuentemente
 ● Uso ocasionalmente
 ● No aplicado

Fuente:(Velásquez et al., 2016)

1.7 Investigaciones en fibras naturales aplicadas al reforzamiento del concreto desarrolladas en Latinoamérica

Actualmente, existen diferentes estudios realizados por investigadores en Costa Rica, Venezuela, Ecuador, Nicaragua, Perú y Brasil, siendo este último país el que ha tenido mayores investigaciones en concretos reforzados con fibras vegetales. Las fibras estudiadas han sido la fibra de bagazo de caña, fique, fibra de coco, bambú, agave, cáñamo, yute, cabuya, curauá, e inclusive con fibras de zanahoria.

Los resultados obtenidos hasta ahora por los investigadores sugieren que los concretos reforzados con fibras vegetales son materiales potenciales y alternativos en la industria de la construcción. Los investigadores sugieren que estos pueden ser aplicados para fines no estructurales, y para la construcción de viviendas de bajo costo. Sin embargo, han coincidido en que se deben desarrollar mayores investigaciones para obtener resultados precisos y confiables, ya que las conclusiones que se obtuvieron del concreto con adición de fibra vegetal, como la fibra de coco, yute, cáñamo, bagazo de caña y fibra de fique, entre otros, mejora significativamente la flexibilidad y transmisión de carga de las muestras o ensayos realizados.

Además, sugieren que se debe incentivar al desarrollo de investigaciones en dicho campo con fibras naturales, no solo con fines no estructurales, sino también en concreto estructural, para así contribuir con el uso de materiales renovables que ayuden a mitigar el impacto ambiental, logrando reemplazar las fibras sintéticas por fibras naturales.

De otro lado, Espinoza (2015), en una investigación realizada sobre el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar, identificó que con la adición de fibra de 1.5% del volumen de la mezcla se obtienen resistencias de diseño hasta del 85% a los 28 días de fraguado, comparada con la muestra de control. Por lo cual, recomienda su uso en capas de contrapiso y pavimentos, ya que estas no llegan al 100% de su resistencia.

Debido a lo anterior, Espinoza sugiere que se deben desarrollar más investigaciones con diferente dosificación, que permitan obtener una mejor resistencia. Así mismo, propone

desarrollar estudios sobre cómo prevenir la degradación acelerada de la fibra al entrar en contacto con el cemento (Espinoza, 2015).

Por otra parte, Chávez (2018) estudió la adición del 5% y 10% de fibra de agave en la resistencia a la tracción de un concreto de $F'c=210 \text{ kg/cm}^2$, e identificó que las fibras de la lechuguilla tienen propiedades físico mecánicas significativas, tal como su resistencia última a tensión, lo cual permite considerarla como posible refuerzo en el concreto. También determinó que con la adición del 5% de fibra de agave se obtienen resistencias superiores al concreto patrón con 10.1% a los 14 días de curado, y 8.8% a los 28 días de curado (Chávez, 2018).

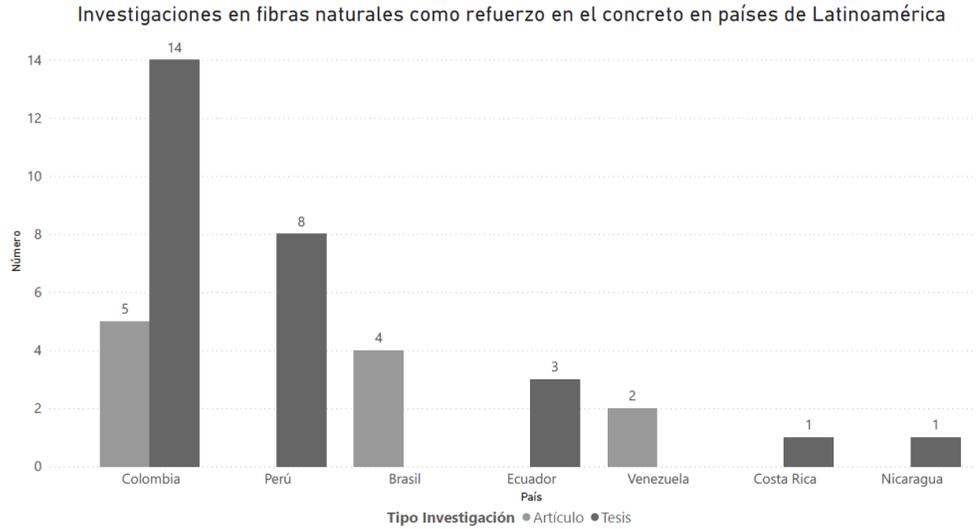
Por otra parte, un estudio comparativo del comportamiento mecánico y de durabilidad del concreto reforzado con polipropileno y fibra de sisal, desarrollado por Silva de Souza y Andrade Silva (2019), concluyó que la fibra de sisal podría proporcionar el mismo nivel de resistencia residual que la fibra de polipropileno, siempre que se considere la equivalencia de dosis de cada fibra. De tal manera que el uso de fibras de sisal como refuerzo del concreto es viable desde el punto de vista mecánico y en relación con su durabilidad, teniendo en cuenta la necesidad de mayores dosis, y un uso de una matriz adecuada (Castoldi et al., 2019).

De otro lado, un estudio comparativo sobre las propiedades mecánicas del concreto estándar vs. el concreto con adición de fibras de bambú y bagazo de caña, desarrollado por (Ferreira et al., 2017) identificó que las muestras de concreto con adición de fibra vegetal cumplieron con la resistencia mínima de 20 Mpa, recomendada según la normativa NBR 6118 para fines estructurales, como también evidenció un aumento de la resistencia a la compresión. El concreto con adición del 2% de fibra de bambú mostró mejor resistencia mecánica y módulo de elasticidad estático en comparación con el concreto con adición de fibra de bagazo de caña y el concreto estándar.

Así mismo, se tienen diferentes investigaciones con otras fibras como la fibra de coco, ramio, zanahoria, bambú y curauá en países como Brasil, Ecuador, Costa Rica, Nicaragua, Perú y Venezuela. Son menos de 40, pero son investigaciones con resultados favorables que contribuyen con información base para continuar con investigaciones en dicho campo. Estos estudios fueron plasmados en la tabla 5 de los anexos.

A continuación, se muestra en la siguiente tabla el tipo de investigación y número de investigaciones realizadas por países en Latinoamérica, según la revisión de literatura.

Tabla 0.2 Investigaciones en fibras naturales como refuerzo en el concreto en países de Latinoamérica.

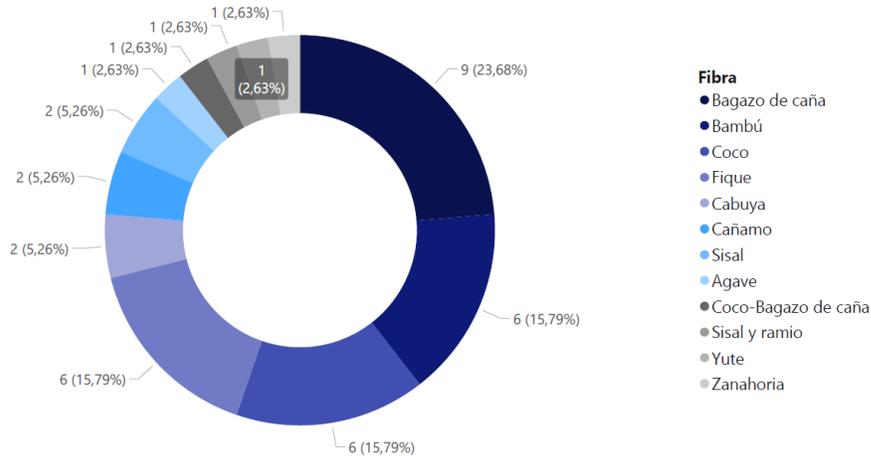


Fuente: Autor. Información tomada de Scopus (2020), Google Scholar (2020).

Según las fuentes consultadas, el desarrollo de tesis de investigación en Latinoamérica ha sido mayor que el avance que se ha tenido en artículos de investigación. Colombia ha sido el país con mayor desarrollo de estudios en el campo de las fibras naturales aplicadas como material de refuerzo en concretos, seguido por Perú, Brasil, Ecuador, Venezuela, Costa Rica y por último Nicaragua.

Figura 0-3. Tipo de fibra natural estudiada para el reforzamiento del concreto en Latinoamérica.

Tipo de fibra natural estudiada para el reforzamiento del concreto en Latinoamérica



Fuente: Autor. Información tomada de Scopus (2020), Google Scholar (2020).

La fibra de bagazo de caña ha sido la más investigada para su aplicación como material de refuerzo en concreto en Latinoamérica, seguida de la fibra de bambú, fibra de coco, posicionándose en cuarto lugar la fibra de fique, la cual cuenta con 6 investigaciones a la fecha.

1.8 Aprovechamiento de fibras de fique como material alternativo de refuerzo en concreto

La generación y disponibilidad de residuos agroindustriales como los obtenidos por la caña de azúcar, la cascarilla de arroz, plátano, residuos como las hojas de piña, en Colombia y en el mundo, presentan una oportunidad para obtener materia prima a partir del desarrollo de nuevos materiales sostenibles. Dichos residuos agroindustriales presentan un gran potencial de aprovechamiento debido a su variedad en su composición química. Es posible obtener materia prima óptima de dichos residuos para utilizarse en diferentes productos de interés ambiental (Peñaranda et al., 2017).

En Colombia existe dicha materia prima, la cual es posible utilizar como recurso renovable para el desarrollo de fibras naturales, como las fibras de fique aplicadas al reforzamiento del concreto. Actualmente, se cuenta con grandes plantaciones de fique, plátano, coco y

caña, fibras a las que aún no se les ha dado el valor para el desarrollo de materiales sostenibles en la industria de la construcción.

Para el desarrollo del estudio, fue necesario conocer el impacto ambiental, la generación y el vertido de residuos que se dan en la etapa de “la cuna a la puerta” del material para de esta manera determinar la huella ecológica de la fibra de fique y la fibra de polipropileno como material de refuerzo en el concreto.

De tal modo que, para evaluar la incidencia ambiental del material, se establecieron los siguientes criterios:

- ✓ Consumo de recursos naturales en el proceso de cultivo y proceso de industrialización de las fibras de fique.
- ✓ Consumo de energía en las entradas y salidas del ciclo de vida del material.
- ✓ Valoración de las emisiones que genera el material en la etapa de “la cuna a la puerta”.
- ✓ Impacto ambiental del material sobre el ecosistema.

Si bien, la construcción no es un proceso ecológico por naturaleza, Levin (1997) indicó que la construcción y las operaciones de edificios tienen un efecto directo e indirecto masivo sobre el medio ambiente. Los impactos ambientales son generados debido al agotamiento de los recursos; las pérdidas de diversidad biológica por la extracción de materia prima; los problemas de los vertederos, por la generación de desechos; inclusive, contribuye a una menor productividad de los trabajadores, y a la salud humana adversa. Todo ello, debido a la mala calidad del aire interior, al calentamiento global, la lluvia ácida, y el smog derivado de las emisiones generadas por la construcción (Enshassi et al., 2014).

Por consiguiente, el 40% de las materias primas en el mundo, que equivalen a 3000 millones de toneladas por año, son destinadas para la Construcción. De igual manera sucede con el 17% del agua potable, el 10% de la tierra y el 25% de la madera cultivada, valor que asciende al 70%, si se considera el total de los recursos madereros (Agudelo, Hernández, & Cardona, 2012). Todos estos materiales deben ser extraídos de la corteza terrestre, a cuenta de la destrucción de energía y hábitat.

Como consecuencia de lo anterior, se crea la necesidad de construir con materiales amigables con el medio ambiente, y de crear edificaciones con materiales renovables, considerando el bajo consumo de energía para su construcción y mantenimiento junto con el proceso de demolición de la estructura (Pertuz, 2010).

1.9 Beneficio ambiental del uso de fibras naturales en el desarrollo de materiales alternativos como refuerzo en concreto

El creciente interés en los materiales sostenibles ha vuelto a poner de relieve el uso de biofibras como refuerzo del concreto. Por lo cual, cabe destacar, que de acuerdo con la revisión de literatura, se identificó que los elementos de concreto reforzado con fibra natural pueden alcanzar propiedades mecánicas comparables con los elementos tradicionales, lo que podría ser un valor agregado por ser materiales provenientes de fuentes renovables, siendo menos costosos, y en cuanto abren nuevas posibilidades para su aplicación en concretos fibroreforzados.

El uso de biofibras como refuerzo para el concreto puede producir un ahorro ambiental significativo. La sustitución de los refuerzos tradicionales, además de contribuir con el ahorro ambiental, fundamental en la producción de concreto. Así mismo, conlleva un notable potencial de reducción de costos, lo que lo convierte en una opción interesante para la demanda de vivienda, cada vez mayor en el mundo. Esto abre un campo de nuevas oportunidades para la aplicación de dichas fibras en materiales de construcción (Escamilla & Wallbaum, 2011).

La conciencia ambiental y la eficacia en función de los costos motiva a los investigadores a desarrollar investigaciones sobre el desarrollo de materiales sostenibles, basados en fibras naturales, ya que es un material que reduce el consumo de energía, y un ahorro de costo a la hora de crear el material, sumado a la ventaja de no ser un material abrasivo; un material que reduce las emisiones de dióxido de carbono.

Estas fibras naturales, que han sido investigadas para el desarrollo de materiales sostenibles en la construcción en Colombia, presentan las siguientes ventajas ambientales según autores como Bohórquez (2011), Barbosa & Mayorga (2015), Quirós (2018), Pérez (2014), y Pinto & Figueroa (2016).

- ✓ Son ambientalmente amigables, en su proceso de producción y desecho final del ciclo.
- ✓ Son renovables y se necesita menor cantidad de energía de entrada por unidad de producción.
- ✓ Tienen propiedades similares a aquellos materiales con refuerzo de fibra de vidrio.
- ✓ Poseen mejor elasticidad.
- ✓ Son menos abrasivos durante el proceso de fabricación.
- ✓ Absorben bien las vibraciones y por lo tanto el sonido.
- ✓ Resultan de 2 a 3 veces más económicas que cuando se trabaja con la fibra de vidrio o una fibra tradicional sintética.
- ✓ Se pueden mezclar con biopolímeros como almidón, lignina, hemicelulosa, caucho, si se requiere un compuesto 100% biodegradable
- ✓ Producen menor producción de dióxido de carbono y otros gases tóxicos, cuando se queman los compuestos con fibras naturales.

Si bien, los avances de investigaciones en el campo de las fibras naturales han sido satisfactorios, es posible que con el uso de fibras naturales se podría contribuir en algún grado, con la disminución de la deforestación de bosques, y el no uso de los desechos biodegradables con la consiguiente degradación ambiental (Tapia et al., 2006).

1.10 Fibras de fique en Colombia

En Colombia, una de las fibras con mayor producción es la fibra de fique, planta originaria de la América tropical. El fique se cultiva en el departamento de Nariño, principal productor 41%, seguido por Cauca 39%, Santander 7%, Antioquia 6% y Guajira 6%. Estos 5 departamentos concentran el 99% de la producción total. Dicho cultivo se comercializa en un 90% a grandes compañías para el desarrollo de empaques y el 10% a microempresas de empaques artesanales (Fenalfique, 2019).

No obstante, el cultivo del fique es de tardío rendimiento, inicia su etapa de producción a partir del cuarto año de establecimiento, con un horizonte de 20 a 30 años de producción. Su rendimiento varía año a año, como también varía según la calidad del suelo, la manera de como el suelo fue trabajado, la calidad y cantidad de abonos químicos y orgánicos que se aplicaron durante la preparación del suelo, entre otros (Minagricultura, 2018).

Esta planta produce fibras largas, duras y resistentes, el desarrollo de la plantación, tiene una duración de 36 meses, momento en el cual inicia su cosecha.

Tabla 0.3 Área, producción y rendimiento del fique a nivel departamental.

Dpto.	ÁREA SEMBRADA (Has.)				ÁREA COSECHADA (Has.)				PRODUCCIÓN (Ton.)				RENDIMIENTO (Ton/HA.)			
	2016	2017	2018	2019*	2016	2017	2018	2019*	2016	2017	2018	2019*	2016	2017	2018	2019*
NARIÑO	5.959	5.982	6.123	6.201	5.167	5.775	5.947	6.238	6.937	7.454	7.742	8.287	1,34	1,29	1,30	1,33
CAUCA	5.198	5.199	5.556	5.627	4.118	5.119	5.346	5.608	5.950	7.528	7.537	8.067	1,44	1,47	1,41	1,44
SANTANDER	1.090	898	1.010	1.023	673	595	895	939	843	1.356	1.377	1.474	1,25	2,28	1,54	1,57
ANTIOQUIA	1.731	2.061	2.254	2.283	793	683	761	798	1.168	1.040	1.123	1.202	1,47	1,52	1,48	1,51
GUAJIRA	279	314	469	475	54	77	269	282	270	385	1.091	1.168	5,00	5,00	4,21	4,14
RISARALDA	106	106	106	107	106	106	106	111	85	85	85	91	0,80	0,80	0,80	0,82
BOYACA	37	35	37	37	35	35	35	37	23	24	23	25	0,67	0,68	0,67	0,67
N. SANTANDER	15	14	14	14	15	6	6	6	8	3	3	3	0,50	0,50	0,50	0,51
CALDAS	42	1	1	1	32	1	1	1	37	1	1	1	1,16	1,00	1,00	1,02
TOTAL	14.457	14.610	15.570	15.769	10.993	12.397	13.366	14.020	15.321	17.876	18.982	20.318	1,51	1,62	1,43	1,46

Fuente: (Agronet, 2019).

1.10.1 Procesamiento de la fibra de fique

A continuación, se muestra descripción en 6 pasos del proceso de obtención de la fibra de fique, esta información fue tomada de la investigación realizada por Daniela Duque, acerca de la optimización de los subproductos del fique (Duque, 2011).

1. Después de tener la cosecha, se **cortan** las pencas de las plantas (hojas del fique) y se agrupan teniendo en cuenta la longitud, sanidad y color y así, clasificar por calidad la fibra y no tener que separarla posteriormente.
2. Seguido, se hace un **despalmado** en la base de la hoja con el fin de disminuir motas y enredos en la fibra durante el desfibrado.
3. Después de esto, se realiza el **desfibrado** de las pencas el cual es el proceso más importante y se debe hacer antes de 12 o 15 horas luego del corte.

Para realizar el desfibrado, separación de la corteza de la hoja con la fibra y demás componente; se hace de forma manual o con máquina con motor a gasolina o diésel. El motor da vueltas a un molino de cuchillas que raspan la penca hasta separar la fibra larga de los demás componentes.

Inicialmente se introduce la hoja despalmada por la base hasta $\frac{1}{4}$ de la hoja en la máquina, luego se jala y se introduce por la punta hasta desfibrarla completamente y remover toda la celulosa de la fibra. Y así seguidamente penca por penca hasta terminar con la cosecha.

4. Luego de obtener la fibra, esta pasa a la **fermentación** para la obtención de una fibra de mayor calidad, no se debe hacer tan solo un lavado de esta. Se crea una capa de fibra en la base de un tanque la cual es luego tapada a ras con agua, se macera la fibra y se deja hasta el próximo día. Al día siguiente se **lava** la fibra y se **sacude**.
5. Luego, se pone la fibra abierta en líneas de alambre para el **secado** requerido de un 12% de humedad.
6. Finalmente se empaca la fibra haciendo manojos de 1 kilo y bultos de 50 o 40 manojos.

Figura 0-4. Proceso de obtención de la fibra de fique.



Fuente: (Duque, 2011).

Tabla 0.4 Composición química de las fibras de fique.

Cenizas	2.60%
Fibras	1.58%
Pentosas	17.65%
Lignina	12.00%
Celulosa	62.70%

Fuente: (Bohórquez, 2011).

1.10.2 Impactos ambientales en la producción del fique en Colombia

Colombia es el principal productor de fique a nivel mundial. El fique es una planta que se adapta a diferentes condiciones edafoclimáticas, creciendo inclusive en terrenos semidesérticos.

El recurso humano utilizado en el sector se caracteriza por tener un bajo nivel educativo, pero con un alto grado de experiencia en el cultivo y su proceso, ya que está vinculado a operaciones básicas y rutinarias. El nivel de tecnificación y dificultad para la innovación y transferencia de tecnología es bajo, debido a la deficiente capacitación de los agricultores. Actualmente, se tiene baja oferta de soluciones tecnológicas para la industria del fique que permita procesos más eficientes y seguros (Agronet, 2019).

En efecto, los productores actualmente poseen poca capacitación para un mejor aprovechamiento del fique existente, pues en la actualidad para la obtención de la fibra se está utilizando solo el 4% de la misma, produciéndose un 96% en desechos, producto del proceso de desfibrado, lo que causa deterioro de la capa vegetativa del suelo y puede ocasionar contaminación de efluentes cercanos por corrientes de lluvia pasantes (Duque, 2011).

De otro lado, el fique tiene una variedad de aplicaciones industriales y artesanales, ya que es una fibra biodegradable que al descomponerse se emplea como alimento y abono, ofreciendo ventajas enormes para la conservación del medio ambiente (Fenalfique, 2019).

Pese a ello, de acuerdo con lo anterior, hace falta reforzar la tecnología de los procesos de industrialización de la fibra de fique, con el fin de reducir los desechos y la contaminación que estos generan. Se debe capacitar la mano de obra e implementar el 96% de la planta que no se utiliza, como el bagazo y el jugo, los cuales poseen un gran potencial para ser utilizados en el desarrollo de nuevos productos.

1.10.3 Fibra de fique en el reforzamiento del concreto en Colombia

La fibra de fique presenta propiedades mecánicas apropiadas para ser implementada como adición en el diseño de mezcla de concreto. Dicha fibra como adición aumenta la absorción de energía y deformación del concreto tras someterse al ensayo de flexión. En otras palabras, ayuda a incrementar la magnitud del módulo de rotura. Además, la fibra actúa como una red que reduce la tendencia del concreto a fracturarse violentamente, al llegar al esfuerzo de falla en compresión, tensión indirecta y flexión (Pinto & Figueroa, 2016).

De allí que se debe continuar con el desarrollo de investigaciones que estudien el comportamiento mecánico influenciado por la adición de la fibra de fique en el concreto, teniendo en cuenta diferentes longitudes, porcentaje de adición de la fibra y la relación agua/cemento, con el fin de obtener resultados más precisos, y de esta manera determinar los valores ideales para obtener una mezcla que cumpla satisfactoriamente con los requerimientos de resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión.

Es importante agregar que los investigadores recomiendan realizar ensayos de velocidad de pulso ultrasónico con los métodos semidirecto e indirecto, para complementar y relacionar los resultados obtenidos con el método directo, y de este modo obtener resultados más precisos. Así mismo, desarrollar investigaciones acerca de la durabilidad de concretos adicionados con fibras de fique, cuando están expuestos a diversas condiciones en ambiente natural y correlacionar estos resultados con los valores obtenidos en los ensayos mecánicos realizados (Pinto & Figueroa, 2016).

Tabla 0.5 Investigaciones desarrolladas en la aplicación de la fibra de fique como material de refuerzo en concreto en Colombia.

Tipo	Año	Título	Conclusión	Cuestionamientos	Fuente
Tesis	2017	Mejora de las condiciones de durabilidad de la fibra de fique como elemento reforzante del concreto.	Los tableros con matriz cementante y fibra de fique previamente tratada con agave de penca como agente reforzante presentan una resistencia competitiva con respecto a la fibra de vidrio, además la durabilidad del material se mantiene estable con el paso del tiempo, el agave no disminuye las características elásticas dadas por la fibra de fique al material compuesto.	1. Investigaciones acerca de la durabilidad de la fibra, tratamientos a o recubrimientos para disminuir el rompimiento de la unión entre las células individuales y así crear una mayor durabilidad del material.	(Jaramillo, 2017)
Tesis	2016	Determinación del comportamiento mecánico de un concreto adicionado con fibra de fique a partir de su resistencia a la tracción, flexión y compresión.	La fibra como adición aumenta la absorción de energía y deformación del concreto tras someterse al ensayo de flexión, es decir; ayuda a incrementar la magnitud del módulo de rotura. Además, la fibra actúa como una red que reduce la tendencia del concreto a fracturar violentamente al llegar al esfuerzo de falla en compresión, tensión indirecta y flexión.	1. Continuar con investigaciones del comportamiento mecánico del concreto por la adición de la fibra en diferentes longitudes, porcentajes de adición y relación agua/cemento. 2. Investigaciones acerca de la durabilidad del concreto con adición de	(Pinto & Figueroa, 2016)
Tesis	2015	Caracterización mecánica del concreto reforzado con fibra de fique modificando la matriz cementicias con aditivos a base de humo de sílice	No se descarta el uso de fibras de fique para el reforzamiento del concreto puesto que la resistencia de compresión y flexión no disminuyó considerablemente entre las muestras de concreto y las muestras de concreto reforzado con fibras de fique sin aditivo	1. Realizar ensayos de durabilidad, fractura y control de fisuración, con el fin de aprobar o no definitivamente el uso de fibras de fique como material de refuerzo en concreto.	(Barbosa & Mayorga, 2015)
Artículo	2014	Evaluación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos a base de fibra de fique y fibras sintéticas.	Los resultados muestran que la fibra de fique puede sustituir a la fibra de vidrio en materiales compuestos de matriz poliéster siempre que la aplicación esté sometida a cargas de impacto y cuya capacidad de operación no supere la quinta parte del compuesto fabricado con fibra de vidrio. Para otros estudios, es necesario tener en cuenta la distribución de las capas de fique de manera adecuada.	1. Se deben realizar mayores investigaciones, en la dosificación de la fibra de fique.	(Pérez Gracia, 2014)
Artículo	2013	Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique	Se determinó mediante las pruebas realizadas en la investigación que un porcentaje óptimo para la adición de fibra de fique al concreto es de un valor cercano a 3.3 Kg/m ³ de concreto o 0.3% de peso con respecto al agregado fino. El concreto con fibra de fique le brinda al concreto características de flexibilidad controlando su fisuración. Aplicaciones al concreto fibroreforzado en construcción de losas, dinteles y vigas de mediana longitud no superiores a 3 metros, para controlar su fisuramiento.		(Pinzón, 2013)
Tesis	2011	Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (Fibra de fique)	La adición de la fibra del fique al concreto le brinda una mejor resistencia a la flexión ya que esta aumenta también con un porcentaje mayor, pasando del 1.0% al 1.5%, siendo los volúmenes máximos permitidos para la mezcla. La ductilidad del concreto mejora en la adición del 1.5% considerándose un valor aceptable para el mejoramiento de la resistencia a la flexión.		(Bohórquez, 2011)

Fuente: Autor.

De manera que, las investigaciones que se tienen hasta ahora en Latinoamérica han dado como resultado, preguntas que generan nuevos estudios, que deben ser desarrollados para establecer parámetros confiables que permitan la aplicación de dichas fibras en el reforzamiento del concreto para fines no estructurales y estructurales, ya que actualmente el desarrollo de investigaciones en dicho campo no ha sido suficiente y se requiere motivar a los investigadores a continuar con el estudio en dicho campo, esto de acuerdo con el análisis de la literatura realizado en la presente investigación.

Tabla 0.6 Investigaciones para desarrolladas sugeridas por investigadores de Latinoamérica en el campo de las fibras naturales aplicadas al reforzamiento del concreto.

Investigaciones por desarrollar	Cantidad	Fibra						
		Bagazo de caña	Coco	Cabuya	Sisal	Zanahoria	Bambú	Yute
Durabilidad de la fibra no tratada químicamente	1						1	
Hormigón con adición de fibra de sisal y su efecto de capilaridad	1				1			
Tratamiento de las fibras naturales	4	2				1		1
Distribución de la fibra en matriz	1				1			
Aplicación estructural	3		1				1	1
Durabilidad del concreto reforzado con fibra natural y durabilidad de la fibra	6	3	2	1				
Dosificación y tamaño de las fibras	6	4	1			1		
Influencia de un aditivo aplicada al concreto reforzado con fibras naturales	1					1		
Aplicación en concreto de alta resistencia	1		1					
Estudiar su aplicación en la construcción de losas y pavimentos	1		1					
Comparativo costo beneficio del uso de la fibra vegetal vs sintética	1			1				

Fuente: Autor.

En Colombia, aún no se han desarrollado investigaciones en fibras de yute y sisal aplicadas al concreto, ya que estas actualmente no se cultivan en el país, las fibras que actualmente se utilizan como la fibra sisal y de yute en otras industrias son importadas. El desarrollo de investigaciones en fibras naturales de origen vegetal aplicadas en el reforzamiento del concreto en Colombia y en Latinoamérica, ha sido realmente poco, por lo cual es necesario continuar investigando en este campo, debido a que los investigadores han obtenido resultados favorables que generan la oportunidad de implementar las fibras naturales como recurso renovable para el reemplazo de las fibras sintéticas.

1.10.4 Composición química de las fibras de fique

La composición química fundamental de las fibras naturales es la celulosa, hemicelulosa y la lignina, a diferencia de las fibras animales que son las proteínas. La composición química de las fibras interfiere tanto en la dificultad del proceso de extracción como en las propiedades físicas, mecánicas del producto final, así como ocurre con su durabilidad ante degradación de tipo químico, térmico, biológico o fotosensible (Salas & Barbero, 2018).

La mayoría de las fibras naturales utilizadas en la construcción tienen porcentajes de celulosa superiores al 60%, componente responsable del buen comportamiento mecánico, el cual permite obtener mejores resultados cuanto mayor contenido en celulosa cristalina esté presente en la fibra. Junto con la hemicelulosa, son los responsables del carácter higroscópico de la fibra que repercute notablemente en las propiedades mecánicas de los elementos constructivos como más adelante se expone (Gurunathan et al., 2015).

Es preciso señalar que todas las fibras naturales contienen celulosa como principal componente estructural, la cual se presenta en forma de microfibrillas cristalinas, alineadas a lo largo de la longitud de la fibra. Aunque es resistente a la hidrólisis y agentes oxidantes, puede degradarse parcialmente cuando se expone a ácidos fuertes.

Las microfibrillas de la celulosa están recubiertas por la hemicelulosa, una estructura de cadenas lineales ramificadas compuestas por polisacáridos de peso molecular inferior, lo cual permite el enlace de las fibras de celulosa con la pectina. La lignina es un polímero que resulta de la unión de varios alcoholes fenilpropílicos, que brindan rigidez a la pared celular, haciéndola resistente al impacto y la flexión; es hidrofóbica, resiste la hidrólisis ácida, es soluble en álcali caliente y de fácil oxidación. Además, la lignificación de los tejidos le proporciona mayor resistencia al ataque de los microorganismos. El contenido de celulosa, lignina, pectina y hemicelulosa en las fibras vegetales influye en sus propiedades, siendo una práctica común eliminar la lignina y la pectina para mejorar el efecto reforzante de las fibras naturales (Salas & Barbero, 2018).

Tabla 0.7 Composición química de los principales constituyentes de las fibras de fique aplicadas en el reforzamiento del concreto en Colombia.

Fibra	Celulosa %	Hemicelulosa %	Lignina %	Referencia
Fique	62.7	-	12	(Pinto & Figueroa, 2016)
Fique	68.36	16.7	7.23	(Muñoz, Hidalgo, & Mina, 2014)
Fique	73.8	-	11.3	(Baldeón, 2013)

Fuente: Autor.

1.10.5 Comportamiento mecánico de las fibras de fique

Algunos autores como Bohórquez (2011) y Pinzón (2013), establecieron el comportamiento mecánico de las fibras de fique. Hasta el momento, de las seis investigaciones que se tienen en fibras de fique en el país, dos de estas han establecido el comportamiento mecánico de las fibras de fique.

Tabla 0.8. Propiedades mecánicas de las fibras de fique.

Fibra	Resistencia a la tracción (Mpa)	Módulo de Young (Gpa)	Elasticidad (%)	Ángulo de microfibrillas (θ)	Absorción (%)	Referencia
Fique	200-625.20	5.50-25.50	3.20-5.70	-	-	(Pinzón, 2013)

Fuente: Autor (2020).

Es necesario el desarrollo de mayores investigaciones para evaluar y establecer el comportamiento mecánico de las fibras de fique.

1.10.6 Durabilidad de las fibras de fique

Las fibras naturales, como las fibras de fique, presentan como principal problema su durabilidad, ya que estas fibras comienzan a descomponerse cuando los componentes orgánicos de las fibras reaccionan con los alcalinos presentes en el concreto (Jaramillo,

2017). De manera que es necesario que las fibras sean sometidas a diferentes tratamientos para evitar que sean afectadas por la alcalinidad.

Por ello, se requieren mayores investigaciones acerca de la durabilidad de las fibras de fique. Hasta ahora solo se tiene una investigación desarrollada por Jaramillo (2017), quien estudia los diferentes tratamientos naturales a los cuales pueden ser sometidas las fibras de fique para mejorar su durabilidad.

1.10.7 Tratamiento de las fibras de fique

No se tienen establecidos los tratamientos químicos o naturales de las fibras de fique para el mejoramiento de su durabilidad. Actualmente, solo se cuenta con la investigación desarrollada por Jaramillo (2017), quien evaluó los diferentes tratamientos de las fibras de fique para mejorar su durabilidad. Dicho autor identificó la influencia de la adición de jugo de fique a una matriz cementante, y las influencias de este en la durabilidad del material, demostrando que el aditivo aumenta la plasticidad, y reduce el contenido de agua de la mezcla hasta en un 25%.

En lo que respecta al concreto endurecido, determinó que se reduce la absorción capilar y la densidad. Las resistencias mecánicas se disminuyen por efecto de la inclusión de las burbujas de aire, pero pudo obtener valores por encima del 90% de la muestra sin aditivo, logrando resistencias adecuadas hasta con el 5% del jugo de la mezcla, dando como resultado parámetros recomendados de la estructura de poros que favorecen la durabilidad del concreto.

Por otra parte, se identificó que las fibras de fique tratadas con agave de penca como agente reforzante presentan una resistencia competitiva con respecto a las fibras de vidrio, ya que la durabilidad del material se mantiene estable con el paso del tiempo; además, el agave no disminuye las características elásticas dadas por las fibras de fique (Jaramillo, 2017).

1.11 Uso de fibras sintéticas en Colombia

Por su funcionalidad, las fibras sintéticas se clasifican en microfibras y macrofibras. Ambos tipos se han utilizado en diversidad de proyectos y aplicaciones. Las fibras sintéticas han estado presentes en la industria de la construcción en Colombia desde hace muchos años. Las microfibras se comercializan en el país desde los años ochenta y las macrofibras se han aplicado desde el principio del siglo XXI.

Las normas ACI 544 y ASTM C 1116 clasifican las fibras de acuerdo con su composición (acero, vidrio, sintéticas o naturales). Las fibras con mayor aplicación en Colombia actualmente son las de acero y sintéticas (Toxement, 2018). El concreto con fibras sintéticas es la combinación de concreto convencional con fibras sintéticas, tales como; nilón, poliéster, polietileno y polipropileno, las cuales, al ser incorporadas, ayudan a disminuir la aparición de fisuras por retracción plástica debido al secado del concreto en estado plástico. La fibra de polipropileno es de tipo monofilamento, no fibrilada, totalmente orientada, con un perfil que permite anclarla a la matriz cementante (Acero, 2017).

1.11.1 Beneficios, uso y aplicaciones de las fibras sintéticas en el concreto

Las fibras sintéticas actúan como refuerzo tridimensional, distribuyendo esfuerzos de tensión en el elemento fundido, lo que disminuye la aparición de fisuras producidas por retracción plástica. Estas dan soporte y cohesión al concreto en superficies escarpadas o inclinadas (concreto lanzado), aumentan la resistencia al impacto del concreto y la resistencia a la fatiga (CEMEX, 2020).

Las microfibras de polipropileno cumplen con la norma ASTM C-1116, especificación estándar para el concreto. Se utilizan regularmente para el control de agrietamiento por retracción plástica, y en general NO aportan capacidad estructural al concreto. Las microfibras en el mercado en general tienen un diámetro entre 0.02 mm y 0.05 mm, y regularmente se ofrecen en longitudes desde 6 mm (1/4 in) hasta 25,4 mm (1 in) (Toxement, 2018).

Estas fibras actualmente son aplicables en la mayoría de las estructuras de concreto, especialmente en las de grandes superficies, que durante su proceso constructivo están

expuestas a las condiciones ambientales. Este tipo de situaciones son muy comunes en placas de concreto, grandes superficies recubiertas con morteros de bajo espesor especialmente en muros. En Colombia, comúnmente, es aplicada para reducir la fisuración por retracción plástica en concreto y en la construcción de tanques y estructuras enterradas con refuerzo convencional (Toxement, 2018).

1.11.2 Aspectos técnicos de las fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno están en el mercado en diferente presentación debido a su tamaño y longitud. Para esta investigación se tomaron las microfibras de polipropileno con diámetro entre 0.02 mm y 0.05 mm y longitudes de 6 mm hasta 25.4 mm, que tienen la función de reducir la segregación de la mezcla de concreto, y prevenir la formación de fisuras en el concreto durante el estado fresco o antes de las 24 horas (Antillón, 2016), para obtener mejores resultados. Normalmente, su dosificación en peso oscila entre 0,3 a 1,2 kg/m³ de concreto. Sin embargo, Sika (2012) establece que la dosificación más genérica utilizada en proyectos es de 2 kg/m³.

Es importante agregar que dichas fibras son hidrofóbicas, por lo cual no absorben agua y no son corrosivas; tienen una excelente resistencia al ataque de los álcalis, químico y clorhídrico, y una baja conductividad térmica. Debido a estas características, no tienen un efecto significativo, por ejemplo, en la demanda de agua dentro del concreto fresco; no intervienen en la hidratación del cemento, y no influyen desfavorablemente sobre los efectos de todos los constituyentes en la mezcla de concreto. Las fibras de polipropileno se caracterizan por ser incoloras, y pueden obtenerse de entretejido miniatura de malla de una película de polipropileno virgen (González, 2010).

Es importante señalar que, para crear el polipropileno, es necesario la perforación de pozos de petróleo con el fin de obtener crudo, refinarlo y generar gas licuado de petróleo como materia prima principal para la creación del polipropileno (Amaya et al., 2018). No obstante, éstas también se fabrican en la actualidad, a partir del polipropileno reciclado, aunque, al reciclarlo, sus propiedades mecánicas se ven afectadas, y para restituir las es necesario agregar aditivos (Bueno, 2012).

1.11.3 Microfibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno se dividen en microfibras y macrofibras. La micro normalmente es usada en el rango que va del 0.05 al 0.2% por volumen. Dicha fibra está destinada a evitar la fisuración del concreto en estado fresco o antes de las 24 horas. Estas fibras tienen diámetros entre 0.023 mm a 0.050 mm, pueden ser monofilamento o fibriladas. Debido a sus diámetros tan pequeños, las microfibras se califican con un parámetro denominado Denier. Denier es el peso en gramos de 9.000 metros de una sola fibra (Sika, 2020).

Las microfibras aumentan la resistencia al impacto y a la flexión, reducen la permeabilidad e incrementan la capacidad de carga del hormigón. A su vez, evitan y minimizan la fisuración durante la contracción en estado plástico, previo fraguado del concreto. Permite una dispersión aleatoria que forma una red tridimensional muy uniforme en toda la matriz, dando mayor tenacidad al concreto.

1.11.4 Evaluación de desempeño y normas de las fibras sintéticas

A nivel internacional existen diferentes normas para evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras sintéticas (Toxement, 2018).

- **ASTM C 1609:** Método estándar, para evaluar el desempeño de concreto reforzado con fibras a la flexión.
- **ASTM C 1399:** Método estándar, para obtener la resistencia residual promedio del concreto reforzado con fibras.
- **ASTM C 1550:** Método estándar de prueba, para evaluar la resistencia a la flexión del concreto reforzado con fibras, utilizando un panel redondo cargado en el centro.

En Colombia existen las siguientes normativas en fibras para concretos:

- **NTC 3696:** Método de ensayo, para determinar el tiempo de fluidez del concreto reforzados con fibras.
- **NTC 5541:** Concretos Reforzados con fibras. ASTM C 1116
- **NTC 5721:** Método de ensayo, para la determinación Absorción de Energía Efnarc.

- **NTC 5981:** Método de ensayo, para determinar el esfuerzo residual del concreto reforzado con fibras. ASTM 1399.

En la actualidad en Colombia, solo se utilizan las fibras de acero y sintéticas como material de refuerzo en concreto. Sin embargo, y debido a la necesidad ambiental de crear materiales sostenibles, con base en la revisión de literatura, se identificó la fibra de fique como material de potencial para ser implementado como sustituto de las fibras de polipropileno.

Por otra parte, es importante resaltar, que no se tienen estudios comparativos entre el uso de fibras de fique y fibras de polipropileno, por lo cual es necesario conocer las normativas técnicas que estandarizan el uso de fibras sintéticas para comparar técnicamente las fibras de fique con las fibras de polipropileno (microfibras), teniendo en cuenta dicha normativa.

1.11.5 Fibras sintéticas como material de refuerzo en concretos

Las fibras sintéticas son comúnmente adicionadas al concreto para reducir la fisuración por asentamiento; reducción a la fisuración por contracción plástica; disminución de la permeabilidad; aumento de la resistencia al impacto, la abrasión y la tenacidad. Las fibras sintéticas son diseñadas específicamente para el concreto, y se fabrican a partir de materiales sintéticos que pueden resistir el medio ambiente alcalino del concreto a largo plazo (Concrete Supply, 2017).

Si bien, en la década de los 90, con el auge de la construcción prefabricada, se popularizó el concreto reforzado con fibras de vidrio, al mismo tiempo se desarrollaron investigaciones en torno a la incorporación de las fibras sintéticas; que añadidas al concreto conseguían también mejorar sus propiedades (en estado plástico), presentando otras ventajas adicionales. Entre sus ventajas se encuentran su menor peso en comparación con las fibras de acero, y la ausencia de corrosión de este tipo de fibras. Dentro de estas fibras sobresalen las de polipropileno (Vidaud et al., 2015).

Las fibras como refuerzo secundario para concreto en general pueden clasificarse según diferentes consideraciones: por material y por funcionalidad, geometría y dosificación (ASTMC 1116).

Por material, las fibras sintéticas se presentan en secciones discretas que se distribuyen aleatoriamente dentro del concreto que pueden estar compuestas de acrílico, aramid, carbón, polipropileno, poliestileno, nilón y poliéster, entre otros.

Por otra parte, las macrofibras están destinadas a prevenir la fisuración en estado endurecido, reducir el ancho de la fisura si esta se presenta, y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada. La dosificación más frecuente oscila entre 0.2% a 0.8% del volumen del concreto. Las macrofibras más usadas son las sintéticas y las metálicas, cuyos diámetros varían entre 0,05 mm a 2,00 mm. Las dosificaciones en términos de peso varían así de acuerdo con la densidad del material. Las fibras de acero requieren entre 20 a 50 kg/m³ de concreto, y las fibras sintéticas (polipropileno) entre 2 a 9 kg/m³ (Sika, 2020). Dichas fibras brindan una resistencia superior a la formación de grietas por contracción plástica, mas no brindan ninguna resistencia en las aberturas de ancho de grietas adicionales, causadas por contracción por secado, carga estructural u otras formas de tensión (Miller, 2018).

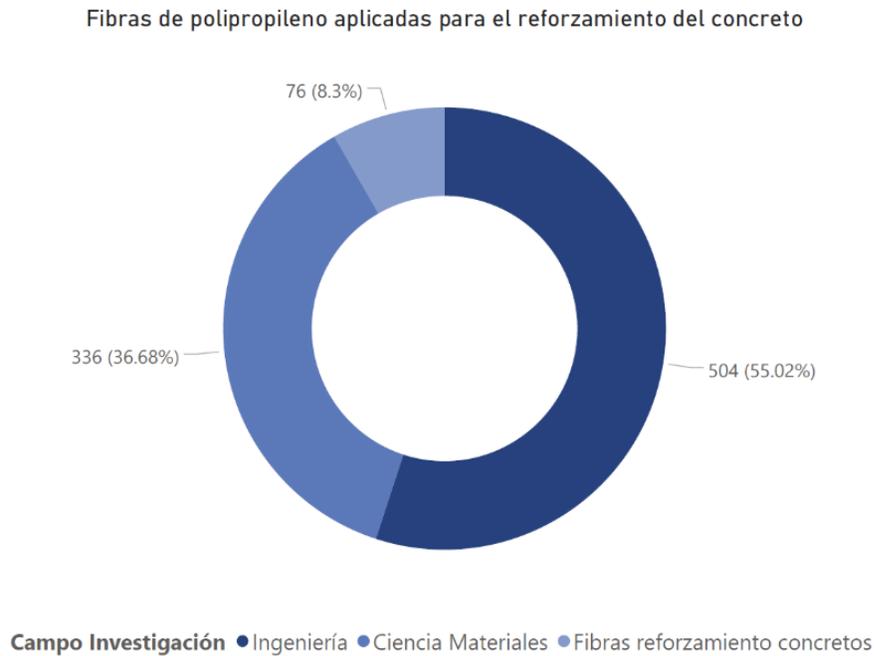
1.11.6 Investigaciones en fibras de polipropileno para el reforzamiento del concreto

En los últimos años, el uso de fibras como refuerzo en el concreto ha tenido un auge importante en los diseños y en su producción, aunque no es una técnica nueva en la industria de la construcción; de hecho, se remonta antes de la aparición del cemento Pórtland y del concreto (Antillón, 2016). Los estudios acerca de las fibras de polipropileno (PP) se iniciaron en los años 60, cuando fueron consideradas como el material sintético adecuado para el reforzamiento del concreto, por la división de la Armada de los Estados Unidos (Vidaud et al., 2015).

De manera que, de acuerdo con la revisión de literatura desarrollada en la investigación acerca del uso de fibras de PP, desde el año 2010 al año 2020, se identificaron estudios acerca de concretos reforzados con fibras naturales, como el yute, coco, la cáscara de arroz, entre otros adicionados también con fibras de PP, con el fin de crear o producir concretos ecológicos, dichos estudios desarrollados por autores como (Martínez et al., 2015) y (Borges et al., 2019).

En la figura 2-5 se muestra el número de investigaciones que se tienen actualmente a nivel mundial en fibras de polipropileno aplicadas como material de refuerzo en concreto, desde el año 2010 al año 2020. La revisión de la información en la base de datos de Scopus se realizó con la ecuación (*polypropylene fibers in concrete reinforcement*).

Figura 0-5. Fibras de polipropileno aplicadas como reforzamiento del concreto



Fuente:(Scopus - Analyze Search Results *Polypropylene Fibers in Concrete Reinforcement 2010 - 2020*, 2020)

De tal modo que, de 840 investigaciones que se tienen en fibras de polipropileno en el campo de ingeniería y ciencia de materiales, 76 investigaciones son específicamente acerca del mejoramiento de las propiedades de flexión, compresión y retracción plástica del concreto, estudios en los que se evidenciaron las ventajas y desventajas físicas y técnicas que presenta dicha fibra, a pesar de que su aplicación ya está consolidada y estandarizada.

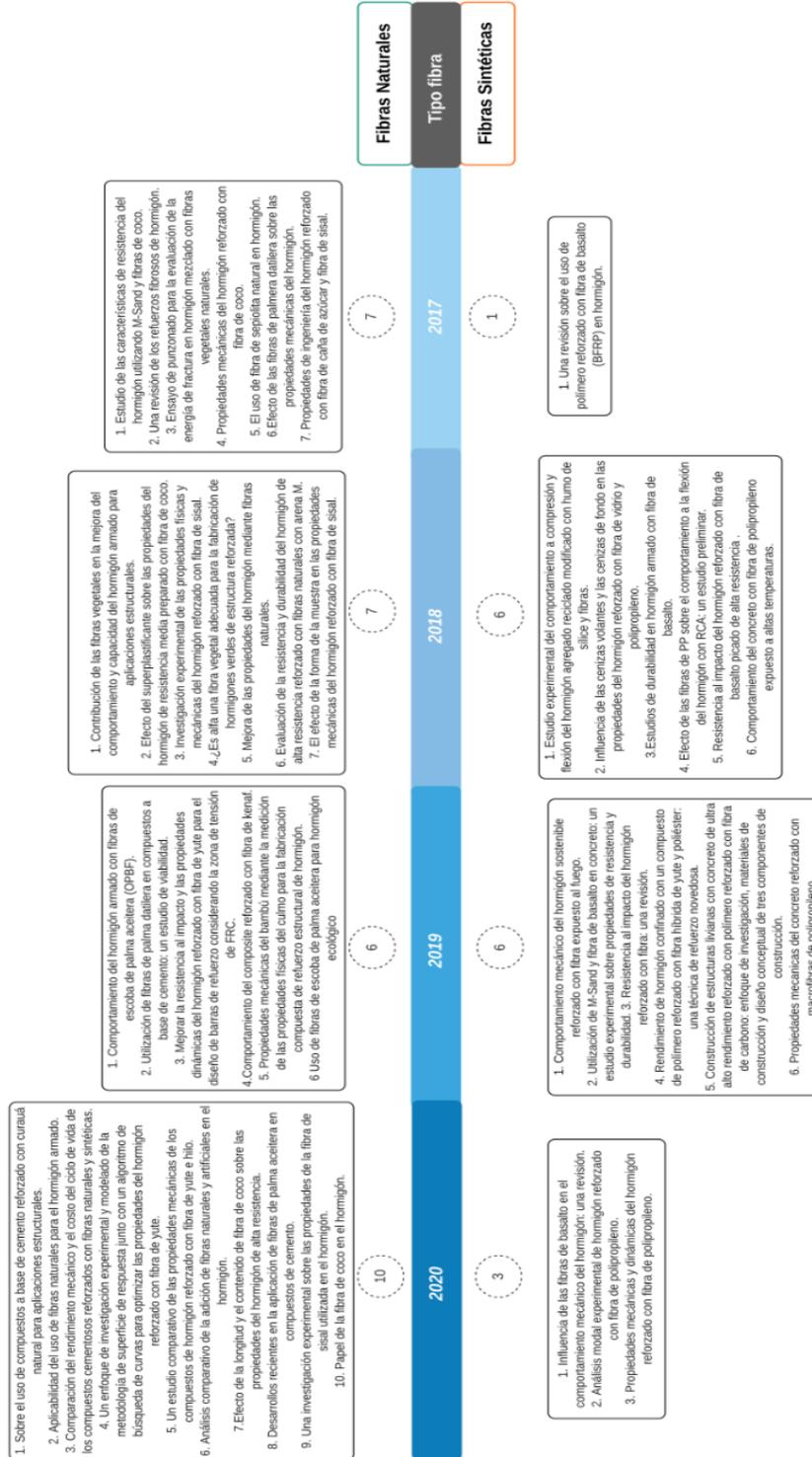
En la revisión de literatura desarrollada se identificó que no existen estudios acerca del análisis de ciclo de vida de la fibra de polipropileno comparado con las fibras de fique.

A continuación, se muestra línea de tiempo de investigaciones desarrolladas en fibras sintéticas a nivel mundial desde el año 2020 hasta el año 2009. Esta línea de tiempo está complementada con investigaciones desarrolladas en fibras naturales, aplicadas como refuerzo en concreto en el mismo rango de tiempo.

La información fue tomada de Scopus, referente a lo anteriormente mencionado con la ecuación de búsqueda (*Synthetic fibers for concrete*), (*Natural fibers as reinforcement in concrete*), (*Scopus - Analyze Search Results Synthetic Fibers for Concrete, 2020*), (*Scopus - Analyze Search Results Natural Fiber for Concrete Reinforcement, 2020*).

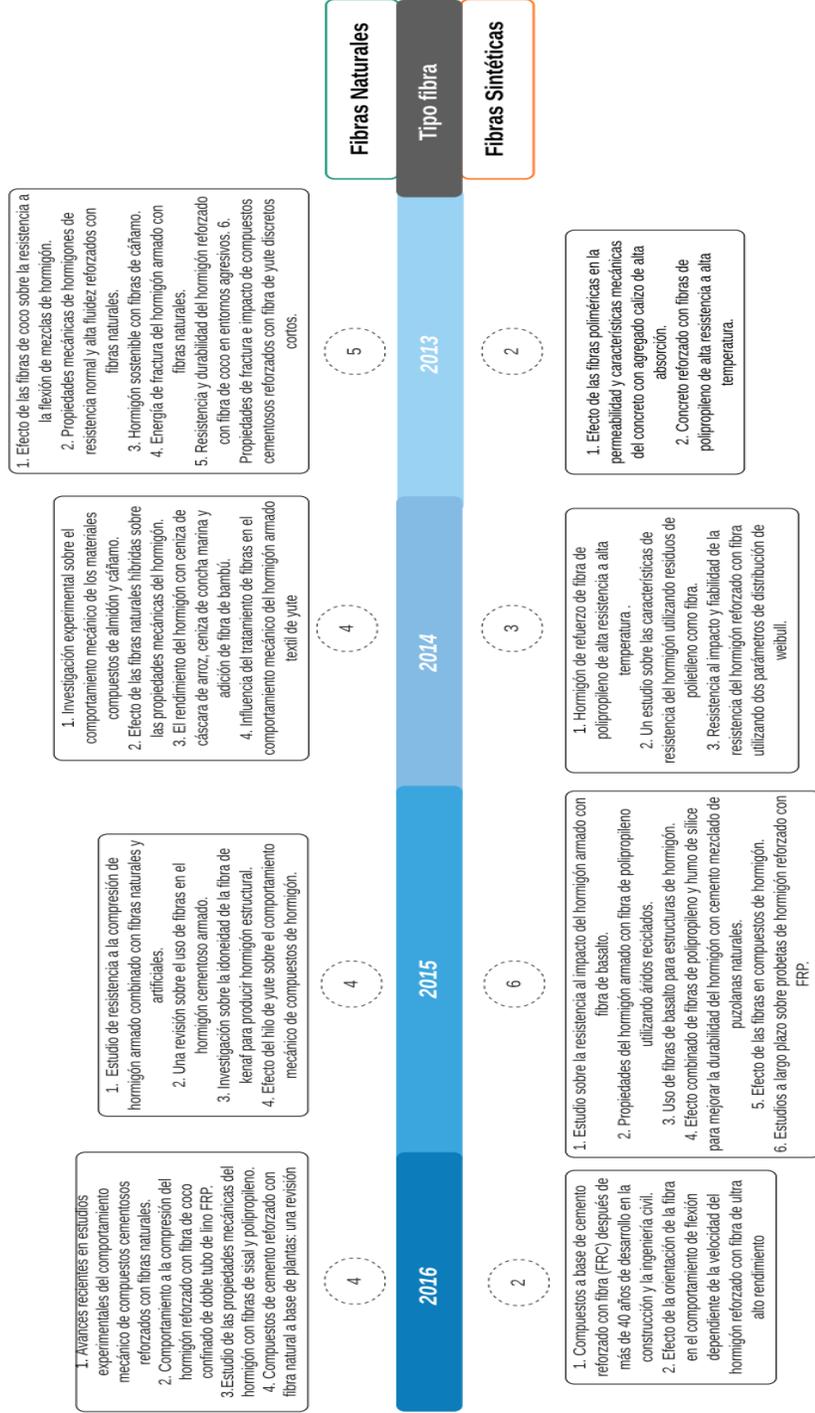
1.11.7 Línea de tiempo, investigaciones en fibras de polipropileno

Línea de tiempo investigaciones en fibras naturales y sintéticas aplicadas a concretos



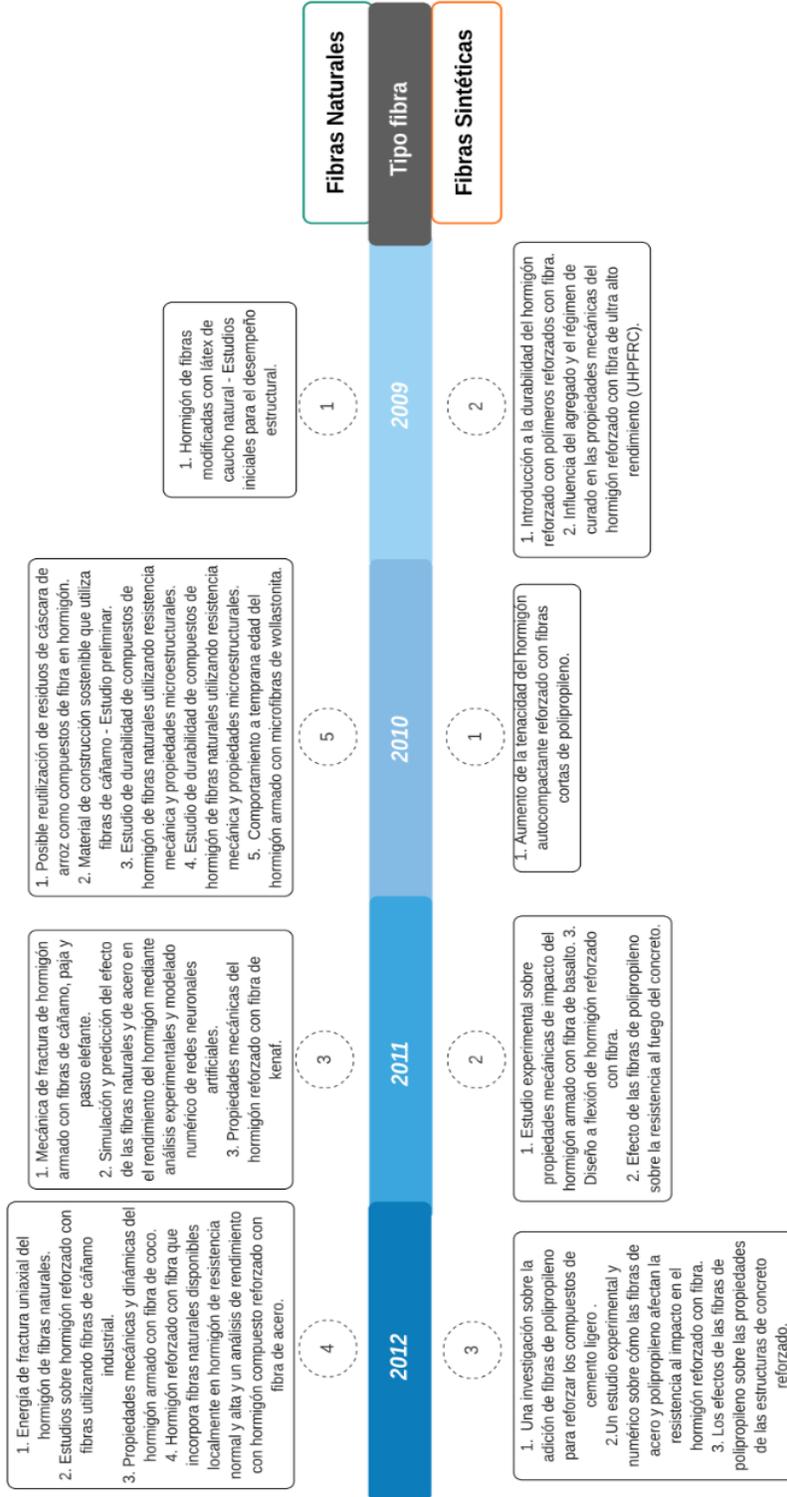
Fuente: Autor, (2020).

Línea de tiempo investigaciones en fibras naturales y sintéticas aplicadas a concretos



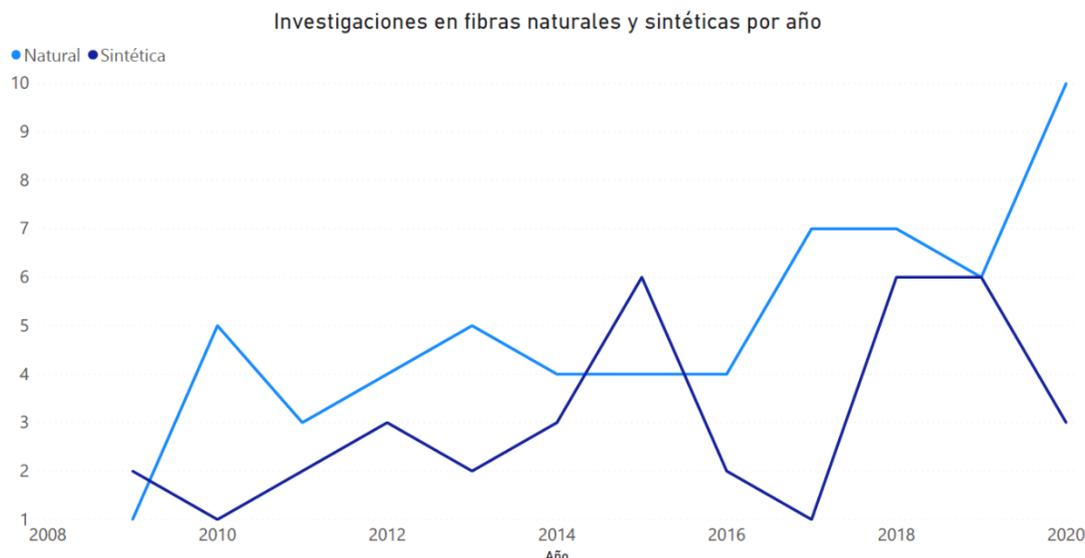
Fuente: Autor, (2020).

Línea de tiempo investigaciones en fibras naturales y sintéticas aplicadas a concretos



Fuente: Autor, (2020).

Figura 0-6. Investigaciones en fibras naturales y sintéticas como refuerzo en concretos desde el año 2009 hasta el año 2020.



Fuente: Autor. Información recopilada de investigaciones en fibras naturales y sintéticas desde el 2009 hasta el 2020. Scopus (2020), Google Scholar (2020).

En efecto, las investigaciones desarrolladas en fibras sintéticas como refuerzo en concretos han disminuido desde el año 2009 hasta el año 2020. La línea de tiempo evidencia que las investigaciones que se han desarrollado en los últimos años han sido en cuanto a la mejora de beneficios y rendimientos de dichas fibras sintéticas para su uso en concretos resistentes a altas temperaturas o expuestos al fuego, en concretos con áridos reciclados, en el comportamiento del concreto con adición de residuos de polietileno como fibras, o en concretos con adición de fibras sintéticas y fibras naturales.

1.11.8 Producción de polipropileno

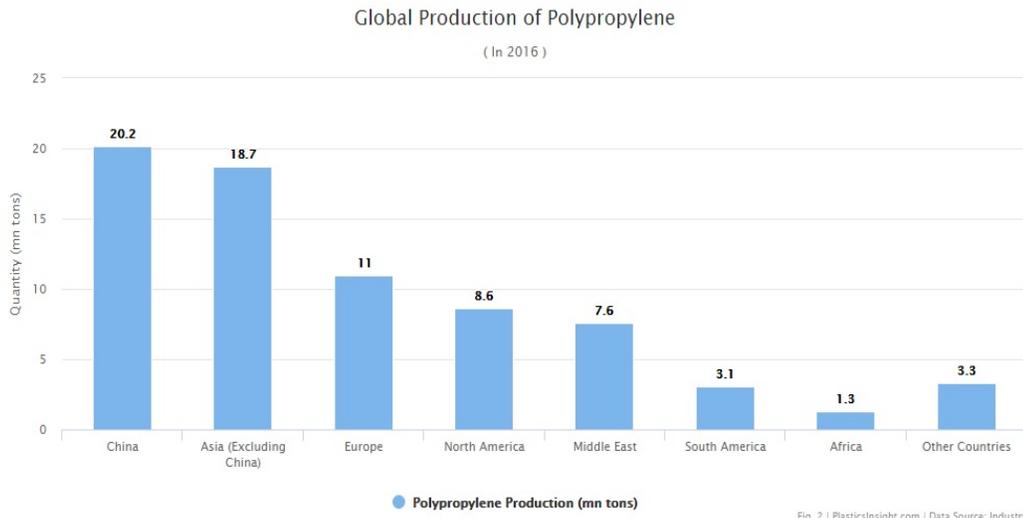
La demanda global de polipropileno en 2013 alcanzó los 55,1 millones de toneladas y se estima un crecimiento del 5.8% hasta 2021. Más de la mitad del polipropileno (PP) comercializado tiene como destino aplicaciones de *packaging*, sobre todo films, seguido de envases en PP rígido. Las fibras de PP para bienes de consumo, también alcanzan una importante cuota de mercado del 12%.

Cabe resaltar que los mayores ratios de crecimiento se esperan en aplicaciones de la industria automovilística. El sector de la construcción, de electricidad y electrónica también

incrementarán la demanda de PP en un 4% anual cada uno. Asia es el país que domina el mercado, pues genera más del 45% de toda la demanda (Packaging, 2014).

Por otra parte, la producción mundial de polipropileno fue de alrededor de 73.7 millones de toneladas en 2016. China produjo 20,2 millones de toneladas con una participación del 27% en la producción mundial total (Plastics Insight, 2016).

Figura 0-7. Producción global de polipropileno

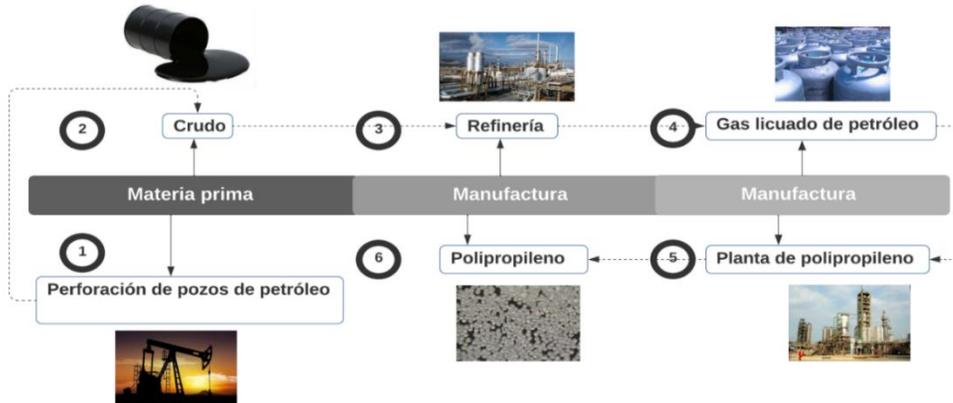


Fuente:(Plastics Insight, 2016).

1.11.9 Proceso de obtención de fibras de polipropileno

Aunque los procesos de obtención de polipropileno son variados, se les puede clasificar en tres tipos, dependiendo del medio de reacción y de la temperatura de operación: proceso en solución, en suspensión y proceso en fase gas. El polipropileno es uno de los constituyentes obtenidos del craqueo térmico o catalítico del petróleo. En condiciones de polimerización adecuadas, el polipropileno produce fibras (Mariano, 2011).

Ciertamente, el polipropileno permite convertirse en fibras o filamentos mediante el hilado por fusión tradicional. Los procesos de hilado y soplado en fusión son técnicas muy importantes de producción de fibra.

Tabla 0.9 Proceso producción de polipropileno.

Fuente: Autor. Información tomada de (Amaya et al., 2018).

El proceso de producción básico incluye la polimerización de gas propileno con la ayuda de un compuesto metálico como el cloruro de titanio. El polímero formado a partir de propileno se suspende en el diluyente para descomponer el catalizador; luego, se filtra, se purifica, y, finalmente, se reduce a resina de polipropileno. La resina así formada se funde y se extruye a través de una hilera en forma de filamento (Rilon, 2020).

1.11.10 Propiedades de las fibras de polipropileno

La materia prima del polipropileno se deriva del C₃H₆ monomérico, que es puramente hidrocarburo. Su modo de polimerización, su alto peso molecular, y la forma en que se procesa en fibras se combinan para dar a las fibras de polipropileno propiedades útiles como las siguientes (NBMCW, 2011);

- Existe una disposición atómica estéricamente regular en la molécula de polímero y una alta cristalinidad. Debido a su estructura regular, se le conoce como polipropileno isotáctico.
- La inercia química hace que las fibras sean resistentes a la mayoría de los productos químicos. Cualquier producto químico que no ataque los componentes del concreto tampoco afectará a la fibra. En contacto con productos químicos más agresivos, el concreto siempre se deteriorará primero.
- La superficie hidrófoba que no se moja con la pasta de cemento ayuda a evitar que las fibras cortadas tengan un efecto de bola durante la mezcla como otras fibras.

- La orientación deja la película débil en la dirección lateral, lo que facilita las fibrilaciones. Por tanto, la matriz de cemento puede penetrar en la estructura de malla entre las fibrillas individuales, y crear una unión mecánica entre la matriz y la fibra.

De apariencia blanca y translúcida, el polipropileno es un termoplástico completo con alta durabilidad y peso ligero. Tiene una densidad baja, una superficie resbaladiza y un coeficiente de fricción bajo (Matmatch, 2020).

Tabla 0.10 Características físicas y químicas de las fibras de polipropileno

Propiedades	Polipropileno
Módulo elástico (N / mm ²)	3500 - 3900
Densidad (kg / dm ³)	0.91
Diámetro (µm)	18
Longitud (mm)	12
Resistencia a la tracción (N / mm ²)	400
Temperaturas de fusión (° C)	160 - 165
Temperaturas de ignición (° C)	360
Conductividad de resistencia a ácidos / álcalis eléctricos	Muy baja
Absorción de agua	0

Fuente: (Ramezaniapour et al., 2013).

1.11.11 Propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno en concreto fibroreforzado.

El polipropileno es un plástico obtenido por medio del propileno extraído del gas del petróleo, es un material termoplástico, incoloro y muy ligero, además es duro y dotado de gran resistencia al choque y la tracción. Posee propiedades eléctricas y presenta una muy buena resistencia a los agentes químicos. El concreto adicionado con fibra de polipropileno muestra resultados positivos en aumento de resistencia a la tracción, confirmando que el

polipropileno, al ser un material resistente a la tracción por sí solo, transmite esas propiedades a la matriz (Sanes, 2017).

Tabla 0.11 Propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno.

(Mendoza et al., 2011)	Modulo elasticidad (GPa)	4.3
	Resistencia tracción (MPa)	620 - 689
(Mohajerani et al., 2019)	Modulo elasticidad (GPa)	10
	Resistencia tracción (MPa)	640

Fuente: Autor (2021).

Las fibras de polipropileno normalmente son utilizadas en gran cantidad de láminas, fibras y filamentos. Entre sus propiedades cabe destacar su alto punto de fusión (no funde por debajo de 160° C), una gran rigidez, alta resistencia a la rotura y a la abrasión, propiedades dieléctricas, bajo rozamiento, superficie brillante y flotación en agua. Son resistentes a los ácidos, a los álcalis y a muchos disolventes orgánicos (Mariano, 2011).

1.11.12 Durabilidad de las fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno no requieren de tratamiento químico para su durabilidad, ya que el PP es en realidad, una forma muy refinada del petróleo, de modo que tiene un poder calorífico muy alto (se degrada a 286°). Cuantificando en años, se podría decir que tardaría 500 en desintegrarse (Ecoclimatico, 2008). Sin embargo, el polipropileno tiene una durabilidad de impacto limitada, los impactos bruscos y repentinos de otros objetos pueden dañar el revestimiento de polipropileno. Por otra parte, el PP tiene poca resistencia a los rayos UV, y su estabilidad al envejecimiento por calor puede verse afectada negativamente por el contacto con metales (Marlinwire, 2020).

1.11.13 Impactos ambientales en la producción de las fibras de polipropileno

Los plásticos son materiales derivados de hidrocarburos, como el gas natural o compuestos orgánicos como el petróleo, ya que para ser producidos requieren pasar por un proceso de destilación en una refinería. Es en dicho proceso, donde se genera el propileno, materia prima para la creación del polipropileno. Para fabricar un kilo de plástico de cero como el PP se emiten 3,5 kg de CO², según el informe del Centro Internacional de

Ley Ambiental, el principal problema del plástico, además de su lenta degradación, es que para elaborarlo se utilizan energías no renovables (ZEO, 2020).

De manera que los impactos ambientales generados por las fibras de polipropileno se producen en una gran parte en su etapa de extracción de la materia prima, la cual es más impactante que su proceso de industrialización.

El factor más impactante se encuentra en la etapa de extracción del petróleo, especialmente en la eutrofización de agua dulce (probablemente ligada al agua inyectada en el pozo de perforación y rechazada al medio ambiente), la radiación ionizante (debido al uso de electricidad) y, por supuesto, en el agotamiento de la energía fósil. El siguiente impacto más importante es el transporte de materias primas, y, por último, el proceso de industrialización, mucho menor en comparación con los anteriormente mencionados (Khelifa et al., 2021).

El polipropileno es un producto totalmente reciclable, su incineración no tiene ningún efecto contaminante, y su tecnología de producción es la de menor impacto ambiental, lo que lo hace atractivo frente a materiales alternativos (Colombiaplast, 2021). Para fabricar un kilo de plástico reciclado se emiten 1,7 kg de CO², esto se da al evitar la primera fase del proceso de producción, la que se realiza en la refinería, logrando reducir la huella de carbono en un 49% (ZEO, 2020).

1.12 Concreto reforzado con fibras de polipropileno recicladas

La fibra de polipropileno reciclada ofrece importantes beneficios ambientales en comparación con las fibras de polipropileno virgen. Sin embargo, estas fibras aún no han sido ampliamente adoptadas por la industria de la construcción, debido a la limitada investigación y conocimiento sobre sus propiedades mecánicas, resistencia a los álcalis y rendimiento en el concreto.

La fibra de polipropileno 100% reciclada tiene una cristalinidad más alta que la fibra de PP virgen. Las fibras de PP reciclada muestran un módulo de Young más alto, no obstante, las fibras de PP 100% recicladas presentan una resistencia a la tracción ligeramente menor

en comparación con la fibra de PP virgen debido a la degradación de su procesamiento repetitivo y vida útil (Cook, 2015).

De otro lado, un estudio reciente desarrollado por Malek, Jackwsik, Lasica y Kadela (2020), en fibras elaboradas a partir de envases de polipropileno (recicladas) como material de refuerzo alternativo para el refuerzo del concreto, concluye que la naturaleza del proceso de curado del concreto reforzado con fibras recicladas es más rápida que la del concreto sin fibras. Dicha investigación fue realizada con diferentes porcentajes de fibras, en la que el 1.0% en peso de fibras de polipropileno adicionadas (1.2 kg/m^3) generó el valor más alto de propiedades mecánicas en el concreto.

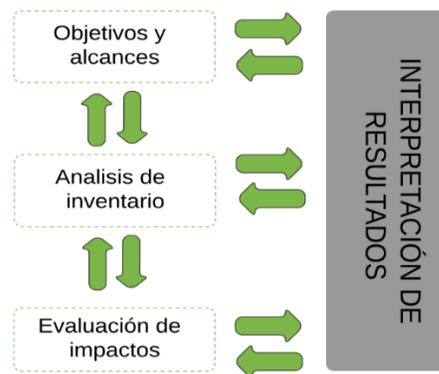
El concreto con fibras de polipropileno reciclado, en comparación con el concreto simple, genera un aumento en la resistencia a la compresión de un 39.4% a 69,7% y en la resistencia a flexión presentó aumenta de 162,4% a 276,0%. Por otra parte, mostró aumento de 254%,2% a 269,4% en la resistencia a la tracción dividida, lo cual indica resultados positivos para el uso de fibras de polipropileno recicladas.

1.13 Análisis de ciclo de vida de las fibras

Según la ISO 14040 (2007), el análisis de ciclo de vida (ACV) trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final.

Esta es una herramienta importante que permite identificar, cuantificar y caracterizar los impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de las fibras de fique y las fibras de polipropileno.

Para el desarrollo del análisis de ciclo de vida de las fibras de fique y las fibras de polipropileno, se tomó como referente la metodología establecida por la norma ISO 14040, donde se determina que el desarrollo del ACV está dividido en cuatro fases diferentes:

Figura 0-8. Fases del ACV

Fuente: Elaborado por el autor. Tomado de la ISO 14040 (2017).

La principal característica de esta herramienta es su enfoque holístico; es decir, que se basa en la idea de que todas las propiedades de un sistema no pueden ser determinadas solo de manera individual por las partes que lo componen. Es necesaria la integración total de todos los aspectos que participan; de allí, la importancia de tener en cuenta todo el ciclo de vida del material (IHOBE, 2009).

1.13.1 Análisis de ciclo de vida de la cuna a la puerta

Es habitual encontrarse con alcances diferentes en el desarrollo de un ACV, siendo los más habituales:

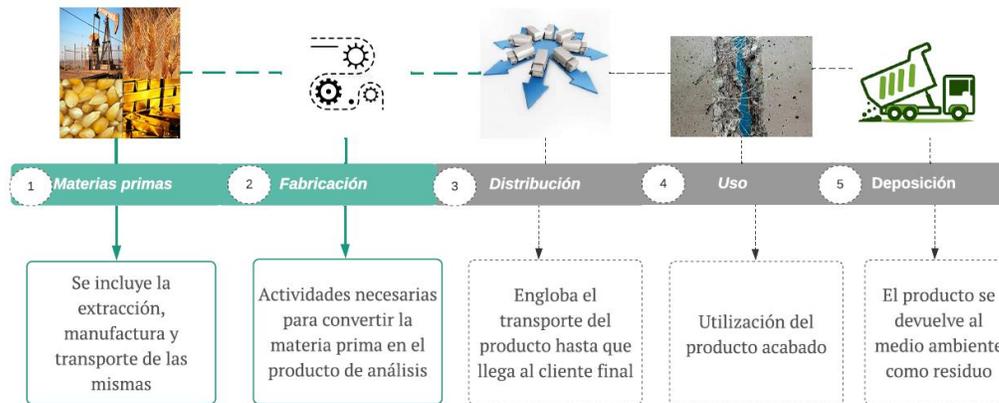
- De la cuna a la puerta: Considera únicamente las fases de extracción de materias primas, transporte y producción.
- De la cuna a la tumba: Examina todas las etapas del ciclo de vida del producto desde la obtención de las materias primas hasta la gestión de los residuos al finalizar su vida útil.
- De la cuna a la cuna: Al igual que en el caso anterior, analiza todas las fases del ciclo de vida del producto, y además incluye la gestión de los residuos al final de la vida, y su reutilización como materia prima que reinicia el ciclo (Twenergy, 2019).

El presente ACV se desarrolló de la cuna a la puerta, contemplando el proceso de obtención de la materia prima, transporte a fábrica y producción, y así, evaluar qué

implicaciones positivas o negativas tienen en su proceso de cultivo y tratamiento, en el caso de las fibras de fique.

Para las fibras de PP, se tuvo en cuenta el proceso de obtención de la materia prima, procesamiento y producción u obtención de las fibras de PP. Es decir, que solo se consideraron las entradas y salidas desde materias primas hasta su distribución. Lo cual, no considera los impactos del uso y deposición (Twenergy, 2019). Ver figura 2-9, donde se muestran las dos etapas que contempla el análisis de ciclo de vida del estudio.

Figura 0-9. Fases del ACV de la “Cuna a la puerta”



Fuente: Autor. Tomado de (Twenergy, 2019).

1.13.2 Definición objetivo y alcance

En la primera fase se define el tema de estudio y se incluyen todos los motivos por los cuales se debe realizar, aplicaciones previstas del estudio, uso de los resultados y destinatario previsto.

Debido a su naturaleza global, un ACV podría ser interminable, y deben establecerse límites a su extensión, de modo que, es necesario definir los límites del sistema a analizar e identificar los componentes del ciclo de vida (ejemplo extracción, transporte, almacenamiento, producción, consumo, reciclaje, disposición final de residuos etc.) (UPC, 2013). Así mismo, es necesario indicar la categoría de impacto que se incluye en el estudio de análisis del ciclo de vida; cómo se asignan los datos del inventario a cada impacto; y cuáles son los indicadores de categoría y modelos de caracterización que se incluyen en el estudio de ACV (Haya, 2016).

Aspectos en la definición del **objetivo**:

➤ Aplicaciones.

Determinar los impactos ambientales generados de forma cuantitativa, en la etapa de manufactura de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno, y así, establecer los puntos críticos del proceso e identificar la que genera menor impacto ambiental.

➤ Destinatario.

Está dirigido, principalmente, el sector académico, con el fin de que otros investigadores puedan continuar con el desarrollo de estudios en fibras alternativas de potencial como las fibras de fique, como material sustituto de las fibras de polipropileno. Ello, como consecuencia de la ausencia de estudios que evalúen el ACV de dichas fibras. Con el resultado del estudio se aportará una base para futuras investigaciones.

Definición del **alcance** del ACV.

El alcance del sistema se limita a las entradas/salidas desde la obtención de materias primas hasta que el producto se pone en el mercado (a la salida de la planta de fabricación y/o montaje) (IHOBE, 2009). De modo que para el presente estudio, el límite del sistema será “de la cuna a la puerta”, delimitándolo solo a la obtención de materia prima, fabricación u proceso de obtención de las fibras, excluyendo la etapa de uso, reciclaje y disposición. Si bien el polipropileno actualmente se recicla y se convierte en un nuevo producto, la etapa de reciclaje no está dentro del alcance del estudio.

En el caso del polipropileno, se conoce que entre el 10% y 15% puede ser reciclado, aunque inevitablemente en algún momento va a terminar siendo un residuo (Opemed, 2020). Sin embargo, este estudio no evaluará el beneficio ambiental que puede generar la reutilización de polipropileno, sino que se concentra solo en su fase de obtención de materia prima y fabricación.

De manera que la definición del alcance permitirá enfocar el estudio de los impactos generados en las entradas y salidas de las fibras de fique y las fibras de polipropileno. Sin embargo, conviene señalar que el proceso de fabricación de estas no es análogo, aunque su comportamiento mecánico, como material adicionado, y los beneficios que aportan al mejoramiento de las propiedades del concreto, sí son muy similares.

De otro lado, pese a que las fibras de fique son naturales, no se conoce si es un material sostenible, dado que no se tienen cuantificados los impactos ambientales que estas podrían generar en su proceso de fabricación (cultivo y obtención), lo cual no es posible predecir. Por ello, se establecerán las ventajas o desventajas de una frente a la otra por medio del ACV desarrollado en esta investigación.

➤ Límites del sistema:

Según la NTC-ISO 14040 (2007), los criterios utilizados para establecer los límites del sistema son importantes para el grado de confianza en los resultados del estudio y la posibilidad de alcanzar el objetivo. De manera que fue necesario considerar varias etapas del ciclo de vida, procesos unitarios y flujos como los siguientes:

- Adquisición de materia prima
- Entradas y salidas en la secuencia principal de fabricación/procesamiento
- Producción y utilización de combustibles, electricidad y calor
- Disposición de los residuos del proceso y de los productos

El presente estudio se desarrolló mediante un análisis comparativo entre las fibras de fique y las fibras de polipropileno, de modo que los flujos del sistema se establecieron de tal forma que se pudieran evaluar las ventajas de una frente a la otra, teniendo en cuenta las entradas y salidas junto con el impacto que estas generan en el medio ambiente, en la etapa del ciclo de vida de la “cuna a la puerta”.

➤ Limitaciones.

Esta investigación tomará los datos para el desarrollo del ACV comparativo de la literatura existente, la información referente al proceso de obtención y fabricación de las fibras, y de esta manera, poder evaluar su ciclo de vida y cuantificar los impactos que generan en el medio ambiente.

La metodología sugerida por la ISO 14040 (2007), determina que es necesario definir las limitaciones que tiene el estudio, para tenerlas en cuenta durante la ejecución del ACV para el grado de confianza en los resultados del estudio.

Ciertamente, todas las actividades y procesos generan algún tipo de impacto medioambiental, consumen recursos, emiten sustancias al medio ambiente y generan otras modificaciones ambientales durante su vida (Metropol, 2020); de tal modo que es importante valorar los impactos que se generan en el ciclo de vida de la “cuna a la puerta” de las fibras de fique y las fibras de polipropileno, ya que hasta ahora no se tiene un estudio comparativo que cuantifique esos impactos que pueden influir en el cambio climático, la reducción de la capa de ozono, acidificación, entre otros aspectos.

Por otra parte, una de las limitaciones importantes del estudio fue la ausencia de información en cuanto al ACV de las fibras de fique, ya que actualmente se tiene información de su proceso de obtención y fabricación, mas no sobre los impactos que esta genera, a diferencia del polipropileno, el que sí cuenta con investigaciones acerca del impacto ambiental que produce en cada etapa del ciclo de vida. La literatura existente en polipropileno fue tomada de bases de datos internacionales como Europa y Estados Unidos.

De otro lado, en uno de los estudios que se tiene acerca del ACV del propileno desarrollado por Moretti, Junginger y Shen (2020) identificaron que el proceso NEXBTL (hidrotratamiento más pretratamiento), el craqueo al vapor y la polimerización contribuye con el 38%, el craqueo al vapor con el 26% y el hidrotratamiento con el 23% del total de impactos desde la cuna hasta la fábrica.

En otro estudio desarrollado por Mannheim y Simenfalvi (2020) acerca del ACV del polipropileno, se identificó que las emisiones y el impacto ambiental en la tapa final de vida es mucho menor en comparación con la etapa de producción, distribuyéndolo de la siguiente manera: fase de producción, 91%; fase de uso, 3%, y fase final de la vida útil, 6% sobre el medio ambiente.

Con la presente investigación, se tendrá un primer acercamiento de la viabilidad ambiental de las fibras de fique comparada con las fibras de PP para futuros investigadores. De manera que, al ser un estudio comparativo, los resultados obtenidos del ACV se tomarán como indicadores para determinar las ventajas que puede tener una fibra ante otra. La comparación se validó teniendo en cuenta datos similares del sistema, tomados de la literatura, los cuales podrán ser modificados o mejorados en futuras investigaciones.

➤ Propósito del estudio.

Según la ISO 14040 (2007) es importante establecer las razones por la cual se desarrolla el estudio con el fin de establecer propósitos que contribuyan con el cumplimiento del objetivo establecido.

Con la presente investigación del análisis de ciclo de vida de las fibras de fique y las fibras de polipropileno, se pretende contribuir con la cuantificación de los impactos ambientales que generan las fibras de fique comparadas con las fibras de PP, y así establecer las ventajas o desventajas ambientales de una frente a la otra e identificar cuál de estas dos genera menor impacto al medio ambiente.

➤ Unidad funcional.

Para asegurar el ACV comparativo entre las fibras de fique y las fibras de polipropileno, se debe establecer una base común. El propósito fundamental de una unidad funcional es proporcionar una referencia en la cual se relacionen las entradas y salidas, según la ISO 14040 (2007).

Para este estudio, se ha tomado como unidad funcional 1 kg de fique, al igual que 1 kg de fibras de polipropileno, unidad de medida comúnmente utilizada. Sin embargo, para poder obtener los insumos necesarios, se tuvo en cuenta como referente la producción de 1320 kg de fique por hectárea (Ministerio de Agricultura, 2014), de modo que, con base en estos datos se calculó lo requerido para la producción de 1 kg de fique.

Dado que no es clara la dosificación del uso de fibras de fique en concreto, a causa de la poca información existente, se definió como unidad funcional 1 kg de fibras para el estudio comparativo, teniendo en cuenta el mismo alcance “de la cuna a la puerta”. Sin embargo, existe una investigación desarrollada por Pinzón (2013), que establece que se requieren 3.3 kg/m³ de fibras de fique, de modo que también se cuantificaran los impactos ambientales que genera la fabricación de dicho kg de fibras, comparado con el uso de 2 kg/m³ de fibras de polipropileno, dosificación más genérica establecida para un concreto de 21 MPa (Sika, 2012).

La norma técnica colombiana ISO 14040, (2007) establece que un sistema puede tener varias funciones posibles, y que las seleccionadas para el estudio dependen del objetivo y

el alcance del ACV. Así mismo, que la unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas del producto.

Por lo anterior, en el presente estudio se realizó la cuantificación de los impactos ambientales para 1 kg de fibras, y a partir de ahí se estableció el impacto ambiental que genera el uso de fibras de fique vs. fibras de polipropileno en un concreto de 21 MPa, teniendo en cuenta que la dosificación de cada una de las fibras es diferente. Esto, con la finalidad de que el estudio pudiera ser comparable de las dos formas, ya que como se mencionó anteriormente, no se ha establecido la dosificación de fibras de fique en concretos fibroreforzados.

1.13.3 Desarrollo del inventario del ciclo de vida (ICV)

La fase de análisis de inventario del ciclo de vida (ICV) consiste en recopilar los datos necesarios para cumplir con el objetivo del estudio, es decir, desarrollar el inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio (NTC ISO 14040, 2007). Esta fase del ACV está conformada por la recopilación de datos, cálculo de datos y la asignación de flujos, de emisiones y vertidos.

➤ Recopilación de datos

Esta fase conforma la identificación y cuantificación de las entradas (consumo de recursos) y salidas (emisiones al aire, suelo y aguas y generación de residuos) del sistema del producto durante su ciclo de vida (Haya, 2016). La ISO 14040 (2007) recomienda tener en cuenta el alcance las limitaciones prácticas en la recopilación de datos.

➤ Cálculo de datos

Después de la recopilación de los datos se hace el cálculo de datos, el cual incluye la validación de los datos recopilados, la relación de los datos con los procesos unitarios, y la relación de los datos con el flujo de referencia de la unidad funcional, procesos necesarios para generar los resultados del inventario (NTC ISO 14040, 2007).

Para el cálculo de los flujos de energía se tomarán en consideración las diferentes fuentes de combustible y electricidad utilizadas; la eficiencia de la conversión y distribución del flujo de energía, así como las entradas y salidas asociadas a la generación y utilización de ese

flujo de energía, lo cual se tendrá en cuenta en los procesos de los dos tipos de fibras a evaluar.

➤ Asignación de flujos y de emisiones y vertidos

En esta etapa, se tienen en cuenta las salidas que genera el sistema; pocos procesos industriales producen una salida única o están basados en una relación lineal entre las entradas y las salidas de materias primas. La mayoría de los procesos industriales producen más de un producto, y reciclan los productos intermedios o los residuos de producto (NTC ISO 14040,2007).

Para esta fase de la investigación, se tiene en cuenta el proceso de producción de las fibras de fique y las fibras de polipropileno, equipos y maquinarias que se requieren en cada proceso, transporte y todo lo necesario para el ACV de “la cuna a la puerta”. Para la obtención de esta información se recurrió a la literatura existente, en cuanto al proceso de obtención y fabricación, para así identificar lo requerido para la extracción y procesamiento de las fibras, y de esta manera cuantificar y determinar las emisiones generadas por los procesos.

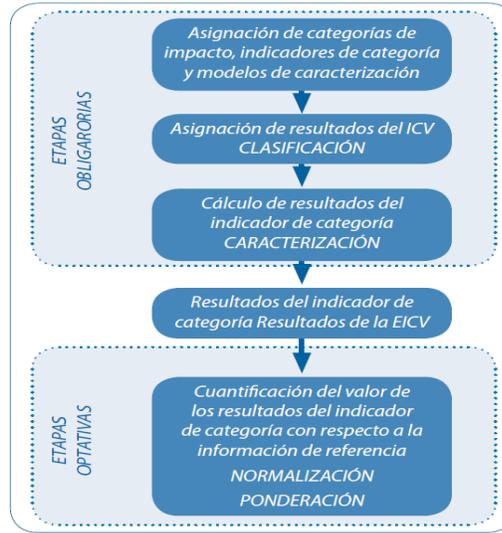
1.13.4 Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)

Según la ISO 14040 (2007), en esta fase se relacionan las entradas y salidas seleccionadas en el inventario con el propósito de evaluar cuan significativos son los impactos sobre el medio ambiente, la salud humana y los recursos con el fin de clasificar, caracterizar y valorar la importancia de dichos impactos. La fase de EICV.

La fase de **clasificación** consiste en el agrupamiento de las cargas ambientales por consecuencia del consumo de recursos y a la generación de emisiones y residuos, en función de los potenciales efectos ambientales que produce cada una de ellas. La **caracterización** es el cálculo de la contribución potencial de cada compuesto detectado en el análisis de inventario a un efecto ambiental. El objetivo de la **valorización** es determinar qué efecto causa el menor impacto teniendo en cuenta el ciclo de vida del producto (PREAD, 2020).

Conforme la ISO 14040 (2007), esta evaluación está totalmente definida donde se plantean algunos elementos obligatorios y otros optativos.

Figura 0-10. Esquema de la fase de EICV según la norma ISO 14040.



Fuente: (IHOBE, 2009).

Tabla 0.12 Categorías de impacto seleccionadas para la investigación.

CATEGORÍA DE IMPACTO AMBIENTAL		UNIDAD DE REFERENCIA	FACTOR DE CARACTERIZACIÓN
Calentamiento global	Fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas	Kg. Eq CO ₂	Potencial de calentamiento global (PCG)
Consumo de recursos energéticos	Energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado.	MJ	Cantidad consumida
Reducción de la capa de ozono	Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica.	Kg. Eq. CFC-11	Potencial de agotamiento de la capa de Ozono (PAO)
Acidificación	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera	Kg. Eq SO ₂	Potencial de acidificación (PA)
Consumo de materias primas	Consumo de materiales extraídos de la naturaleza.	Tm	Cantidad consumida
Formación de oxidantes fotoquímicos	Formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (el ozono-O ₃ es el más importante por su abundancia y toxicidad)	Kg. Eq. C ₂ H ₄	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos (PFOF)

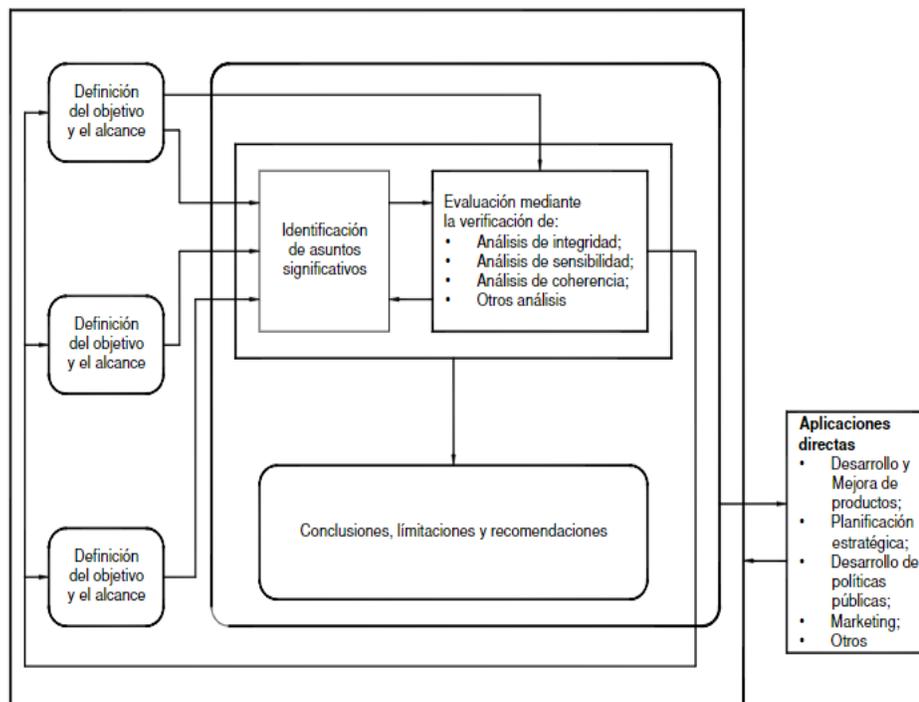
Fuente: (IHOBE, 2009).

1.13.5 Interpretación del análisis de ciclo de vida ACV

Esta fase del ACV combina el análisis de inventario y la evaluación del impacto, para obtener conclusiones y/o recomendaciones para la toma de decisiones. Permite determinar en qué etapa del ciclo de vida del producto se genera mayor impacto ambiental y por tanto, qué puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse (Torre, 2012). Para esta investigación, que comprende el análisis comparativo entre las fibras de fique y polipropileno, permite determinar cuál de las dos fibras presenta un mejor comportamiento ambiental.

La fase de interpretación del ACV comprende varios elementos como se muestran en la siguiente figura.

Figura 0-11. Relaciones entre los elementos en la fase de interpretación con otras fases del ACV.



Fuente: Norma Técnica Colombiana -ISO 14044 (2007).

- Identificación de asuntos significativos basados en los resultados del ICV y la EICV de un ACV.

Según la NTC-ISO 14044 (2007), este elemento tiene como objetivo estructurar los resultados de las fases de ICV o EICV, para ayudar a determinar los asuntos significativos de acuerdo con el objetivo y el alcance y de forma interactiva con el elemento de evaluación. Uno de los ejemplos de asuntos significativo es la categoría de impacto tales como el uso de recursos, cambio climático y contribuciones significativas de las etapas del ciclo de vida a los resultados de ICV o EICV tales como, procesos unitarios individuales o grupos de procesos como transporte y producción de energía.

➤ Evaluación

La evaluación tiene como objetivo fortalecer la confianza y la fiabilidad en los resultados del estudio de ACV o ICV, incluyendo los asuntos significativos identificados en el primer elemento de la interpretación. La ISO 14044 (2007), considera que durante la evaluación se deben aplicar tres técnicas, una de ellas es la verificación del análisis de integridad la cual tiene como objetivo asegurar la información y los datos pertinentes necesarios para la interpretación, verificar que estén disponibles y completos.

Como segunda técnica se tiene la verificación del análisis de sensibilidad, este tiene como objetivo evaluar la confiabilidad en los resultados y conclusiones; por último, se tiene como técnica la verificación del análisis de coherencia que consiste en determinar las suposiciones, métodos y datos coherentes con el objetivo y el alcance.

➤ Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

El objetivo de esta parte de la interpretación del ACV es llegar a las conclusiones, identificar limitaciones de los resultados y realizar las recomendaciones del caso.

Las conclusiones obtenidas del estudio se realizan teniendo en cuenta la ISO 14044 (2007) la cual tiene establecida una lógica de secuencia para el proceso, que consiste en identificar los asuntos significativos; evaluar la integridad, sensibilidad y coherencia de la metodología y resultados; obtener conclusiones preliminares y verificar que sean coherentes con los objetivos y el alcance del estudio.

En esta fase de la presente investigación, se hace el comparativo de los resultados obtenidos del ACV de las fibras de fique y las fibras de polipropileno aplicando los elementos mencionados anteriormente, teniendo como propósito determinar las ventajas o desventajas que tiene una frente a la otra desde el punto de vista ambiental, y así,

identificar cuál de estas dos fibras genera un menor impacto al medio ambiente, por medio del cumplimiento de los objetivos propuestos.

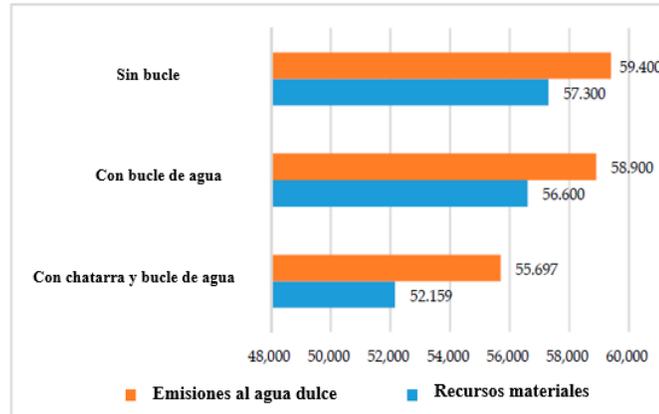
1.13.6 Correlación del ACV con la producción de fibras de polipropileno

El polipropileno es un material plástico derivado de hidrocarburos como el gas natural o compuestos orgánicos como el petróleo. El principal problema, además de su lenta degradación, es que para elaborarlo se utilizan energías no renovables. Actualmente, se conoce que por cada kilogramo de plástico que se fabrica desde cero, se emiten unos 3,5 Kg eq. de CO₂ a la atmosfera (ZEO, 2020).

De otro lado, un estudio realizado por Mannheim y Simenfalvi (2020), acerca del ciclo de vida total de productos de polipropileno, determinó los recursos energéticos y materiales, las emisiones e indicadores de impacto ambiental, dicho estudio fue realizado desde la cuna a la puerta; en la primera etapa (etapa de producción), donde se contempló el suministro de materias primas (granulado de polipropileno, aire comprimido y agua), suministro de energía y moldeo por inyección. Se examinaron tres escenarios de producción; (1) sin método de bucle, (2) con agua de proceso bucle únicamente y (3) con bucle de desechos de plástico recirculado y bucle de agua de proceso.

La figura 2-12 muestra los valores de los recursos materiales y las emisiones al agua dulce para los tres escenarios evaluados. Los recursos materiales y las emisiones al agua dulce son mayores en comparación a otros flujos; por lo tanto, se ilustraron estos parámetros. Los porcentajes de estos parámetros son 48.56% para recursos materiales y 50.33% para emisiones al agua dulce. También, se evaluaron otras emisiones como recursos energéticos, bienes depositados, emisiones al aire, emisiones al agua de mar y emisiones al suelo agrícola e industrial, pero estos valores fueron de 1.14% por lo cual no se mostraron en la figura.

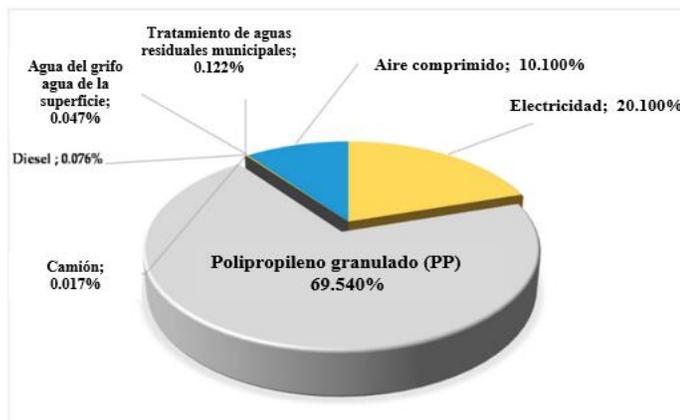
Figura 0-12. Valores de recursos materiales y emisiones al agua dulce en la etapa de producción para los escenarios de producción evaluados con transporte (unidad funcional: 25 kg, unidad de normalización de polipropileno: kilogramo, cantidad de ponderación: masa).



Fuente: (Mannheim & Simenfalvi, 2020).

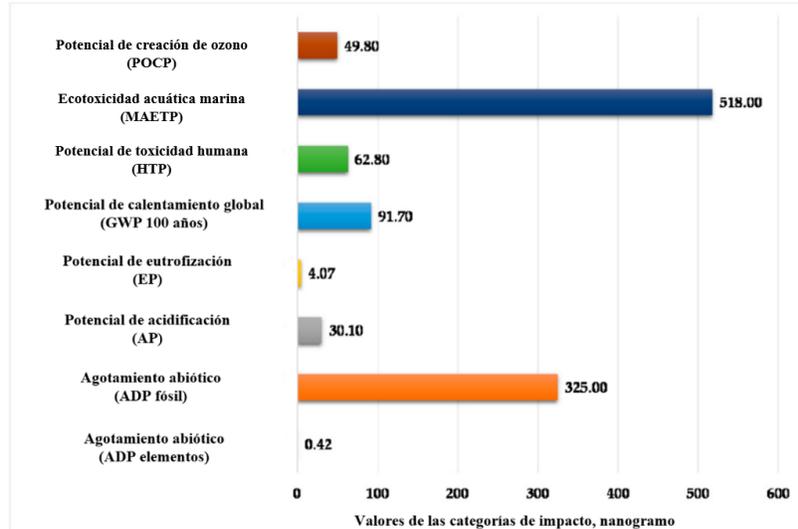
La figura 2-13, muestra los porcentajes de contribución relativa de los materiales de entrada y salidas y los flujos de energía en la fase de producción. Esta figura circular muestra claramente que la carga ambiental más alta proviene de la propia producción de gránulos de polipropileno.

Figura 0-13. Porcentaje de contribución relativa de los materiales de entrada-salida y los flujos de energía en la fase de producción.



Fuente: (Mannheim & Simenfalvi, 2020).

Figura 0-14. Valores de los impactos ambientales en la fase de fabricación con transporte. (Unidad funcional 25 kg de polipropileno, metodología CML 2016, método de ponderación: ciclo de vida de thinkstep).



Fuente: (Mannheim & Simenfalvi, 2020).

Los resultados demuestran que el requerimiento total de energía para la fabricación y el transporte de productos de polipropileno hizo que estas fueran las etapas más intensivas en energía. Los impactos ambientales examinados son más altos en la etapa de producción. Sin embargo, la investigación concluye que es posible disminuir los impactos en el medio ambiente si el proceso de producción y transporte del polipropileno se lleva a cabo de forma más sostenible (Mannheim & Simenfalvi, 2020).

Hasta aquí, ya se ha identificado el impacto ambiental de la producción de polipropileno, mas no del proceso de manufactura de las fibras de fique. Este estudio se concentró en comparar el ACV de las fibras de polipropileno vs. las fibras de fique en la fase de la cuna a la puerta, es decir, solo se consideraron las entradas y salidas de las materias primas hasta la distribución. Actualmente, no se tienen estudios comparativos de ACV entre dichas fibras.

1.14 Herramienta informática utilizada para el análisis de ciclo de vida

Los programas tenidos en cuenta para el desarrollo del estudio fueron GaBi y Open LCA. Open LCA es una herramienta de código abierto para la evaluación del ciclo de vida y la sostenibilidad que cuenta con las siguientes características;

- Cálculo rápido y confiable de su evaluación de sostenibilidad y/o evaluación del ciclo de vida.
- Información muy detallada sobre los resultados de los cálculos y análisis.
- Identificación de los principales impulsores a lo largo del ciclo de vida, por proceso, flujo o categoría de impacto que permiten visualizar los resultados y ubicarlos en un mapa.
- Las mejores capacidades de importación y exportación de su clase; fácil de compartir modelos costes del ciclo de vida y evaluación social, integrados sin problemas en el modelo del ciclo de vida.

Este es un software que trabaja con bases de datos que deben ser comprados o se deben crear las entradas y salidas desde cero, lo cual tomaría mayor tiempo para el desarrollo del ACV del estudio, por lo que por cuestión de tiempo se optó por trabajar con GaBi. Sin embargo, estos programas tienen similitudes en su metodología, son prácticos de usar, pero la ventaja que se tiene en comparación con GaBi, es que este cuenta y permite el acceso a una gran base de datos.

De manera que, el estudio de ACV se desarrolló empleando el software GaBi. Esta herramienta fabricada por “thinkstep” permite modelar cada elemento de un producto o sistema desde la perspectiva del ciclo de vida, y también proporciona una base de datos de contenido de fácil acceso y constantemente actualizada que detalla los costos, la energía y el impacto ambiental de obtener y refinar cada materia prima o componente procesado de un artículo fabricado.

Además de ser una herramienta con más de 25 años en el mercado, es de fácil uso para inexpertos. Permite realizar análisis de flujos de energía y materiales, con metodologías de análisis de impacto como ReCipe, Impact 2002+, traci, Ecoindicador99, Environmental priority strategies (EPS), entre otros.

1.14.1 Método TRACI 2.1 para el análisis de ciclo de vida

Para el desarrollo del ACV del presente estudio se utilizará el método de análisis TRACI 2.1. Esta es una metodología de evaluación desarrollada por la agencia de protección ambiental de EE. UU. TRACI, y corresponde a la abreviatura de “Herramienta para la reducción y evaluación de impactos químicos y otros impactos ambientales”. El objetivo de la herramienta está en ayudar a habilitar la evaluación de impacto para la sostenibilidad, la evaluación del ciclo de vida, la ecología industrial, el diseño de procesos y la prevención de la contaminación.

Se determinó el método TRACI 2.1, debido a que los “midpoints” que se tienen en cuenta: el deterioro de la capa de ozono, el calentamiento global, el smog fotoquímico, la acidificación, eutrofización, cáncer, polución con efectos en la salud humana, efectos sobre la salud humana no cancerígenos, la ecotoxicidad y el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles. Tiene también en cuenta, aunque no los cuantifica, los endpoints: salud humana, ecosistema y medio ambiente humanos (Ruiz, 2016).

Es importante resaltar que, a diferencia de otros, TRACI tiene en cuenta tres criterios para el cálculo de los potenciales ambientales: el destino, la exposición y los factores de toxicidad, lo que permite un acercamiento más ajustado a la realidad del indicador ambiental, disminuyendo la incertidumbre y la variabilidad de los resultados (Ochoa & Rivera, 2014).

En la fase de elección, modelización y evaluación de categorías de impacto hay cierta subjetividad, ya que no todas las categorías están consensuadas (Rieznik & Hernández, 2005). Un ejemplo de categorías de impacto que, según el Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del medio ambiente (CEPIS), generalmente se incluyen, son:

- Disminución de recursos.
- Efecto invernadero (directo e indirecto).
- Disminución de la capa de ozono.
- Acidificación.
- Eutrofización.
- Formación de oxidantes fotoquímicos.

Esta investigación consideró dichas categorías de impacto, teniendo en cuenta el objeto del estudio, el cual busca como resultado contribuir con el desarrollo de materiales renovables, a causa de la necesidad ambiental de crear construcciones sostenibles. Así mismo, teniendo en cuenta que estas son las categorías comúnmente utilizadas según CEPIS.

Por otra parte, cabe resaltar que a la fecha no se tiene un estudio ambiental como el del objeto del estudio. Es por ello que, de acuerdo con la revisión de literatura, se identificaron las categorías implementadas por otros autores como Rodríguez & Rueda (2020), en el ACV de su investigación, "Evaluación de una alternativa de materia prima vegetal en el sector textil, caso estudio empresa The Mob, para contribuir a una gestión ambiental empresarial", quienes tuvieron en cuenta las categorías anteriormente mencionadas.

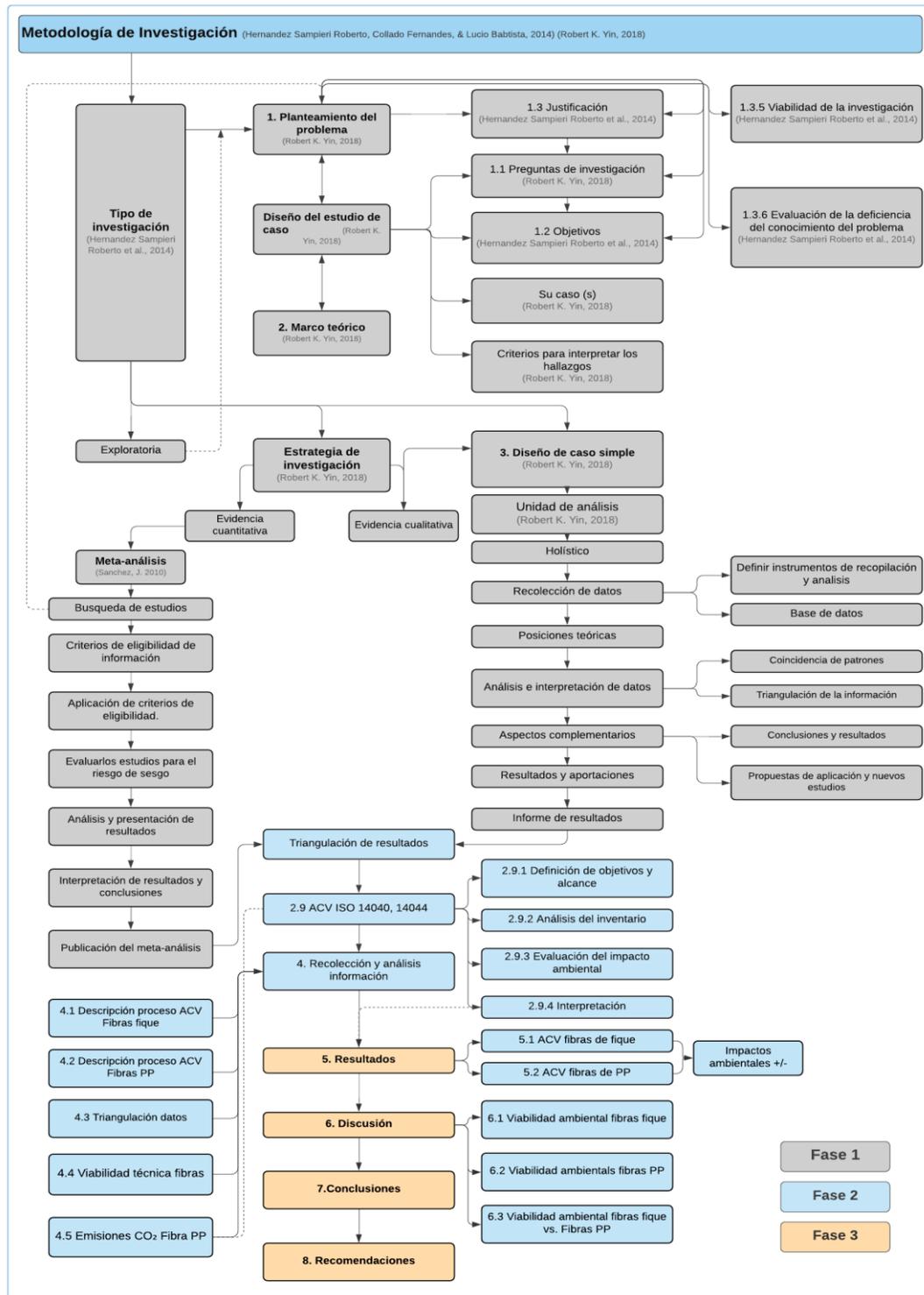
Diseño del estudio de investigación

Para el desarrollo de la investigación, se propuso un estudio de caso simple holístico de tipo exploratorio. Yin (2018), uno de los principales autores en investigaciones con estudio de caso, señala que el estudio de caso es una investigación empírica que estudia un fenómeno contemporáneo dentro de su contexto de la vida real, especialmente cuando los límites entre el fenómeno y su contexto de la vida real no son claramente evidentes. Aunque el campo de la presente investigación no es nuevo, es claro que no se tiene suficiente información para consolidar la aplicación de las fibras naturales en el reforzamiento del concreto. Por tanto, para la obtención de los datos se utilizó una variedad de fuentes tanto cualitativas como cuantitativas realizando una descripción y análisis de las teorías existentes.

Yin (2018), considera que un estudio de caso simple puede usarse para determinar si las proposiciones de una teoría son correctas o si algún conjunto alternativo de explicaciones podría ser más pertinente. El caso simple puede representar una contribución significativa (o significativa) al conocimiento y a la construcción de la teoría (Yin, 2018).

En este caso en particular, se realizó una revisión de literatura sistemática con propósito descriptivo, con el fin de establecer una coincidencia de patrones de los investigadores que han desarrollado investigaciones en dicho campo, y así, identificar el vacío del conocimiento e identificar las propiedades físicas, mecánicas, químicas y características que tiene cada una de las fibras que han sido investigadas para su aplicación como material de refuerzo en el concreto, en países de Latinoamérica y asiáticos debido a la poca literatura que se tiene sobre las fibras aplicadas en el concreto en Colombia.

Figura 0-1. Método de investigación.



Fuente: Autor. Método de investigación basado en la literatura de Robert K. Yin 2018 y Hernández y otros 2014.

El diseño implica una fase inicial, la cual es la revisión sistemática y/o recolección de información y análisis de la literatura existente, así como de los datos cualitativos y cuantitativos. De manera que, con el resultado de la revisión de literatura, se seleccionó el caso de estudio y se diseñó el protocolo de colección de datos.

Para dar respuesta al objetivo principal de la investigación, fue necesario desarrollar la investigación en 3 fases.

1.15 Fase 1 de la investigación

Para llegar a la respuesta del objetivo principal de la investigación, fue necesario dar respuesta a la pregunta de investigación:

¿Cuál es la viabilidad ambiental del uso de fibras de fique como material alternativo vs. la fibra de polipropileno aplicada en el reforzamiento del concreto de alta resistencia?

Para dar respuesta a la pregunta de investigación, fue ineludible conocer todo acerca de las fibras de fique, tal como su proceso de cultivo, fabricación y uso, y, por supuesto, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas como material de refuerzo en el concreto.

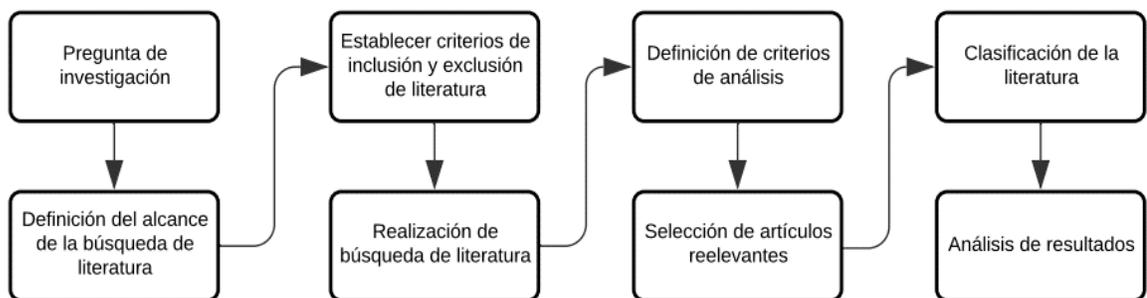
En esta fase, fue necesario realizar una revisión de la literatura de los antecedentes del caso, es decir, investigaciones desarrolladas en el campo de las fibras naturales aplicadas en el reforzamiento del concreto de alta resistencia, desde el año 2008 hasta el año 2020 en países asiáticos y en Latinoamérica, combinando datos de carácter cualitativo y cuantitativo, en virtud de la poca información en el país, que se evidenció durante el desarrollo de la investigación.

Para verificar la confiabilidad de las propiedades que tiene la fibra de fique, se establecieron criterios basados en las teorías existentes de otros investigadores que han evidenciado propiedades competitivas con base en otras fibras vegetales, como la fibra de yute, sisal, coco, plátano y bagazo de caña.

Para establecer criterios, se desarrolló un análisis estadístico cuantitativo de los estudios seleccionados. Para la selección de los artículos u aportes de investigaciones de otros autores, se estableció un protocolo de búsqueda para la revisión y categorización de la información donde se determinó el alcance de la búsqueda de literatura y se clasificó la información.

La siguiente figura registra como se estableció el proceso de búsqueda de literatura.

Figura 0-2. Pasos del proceso de búsqueda de literatura.



Fuente: Autor. Basado en la literatura de revisión sistemática de (Beltrán, 2005) y (Calderón et al., 2014).

Como se mencionó anteriormente, fue necesario establecer un protocolo de investigación, desarrollar la diacronía del caso, determinar o establecer el método de análisis, para lo cual se establecieron criterios para el proceso de selección de documentos, evaluación de la calidad de los documentos y proceso de extracción de los datos.

La búsqueda de literatura se limitó a las fibras naturales aplicadas para el reforzamiento del concreto, específicamente en países de Latinoamérica y países asiáticos, en investigaciones desarrolladas desde el año 2008 hasta el año 2020. Posteriormente, se desarrolló un análisis sistemático riguroso de los estudios seleccionados apoyado en un software llamado RevMan, para así dar respuesta a la pregunta de investigación, la cual fue basada en el análisis del estado del arte.

La primera fase se desarrolló de la siguiente manera:

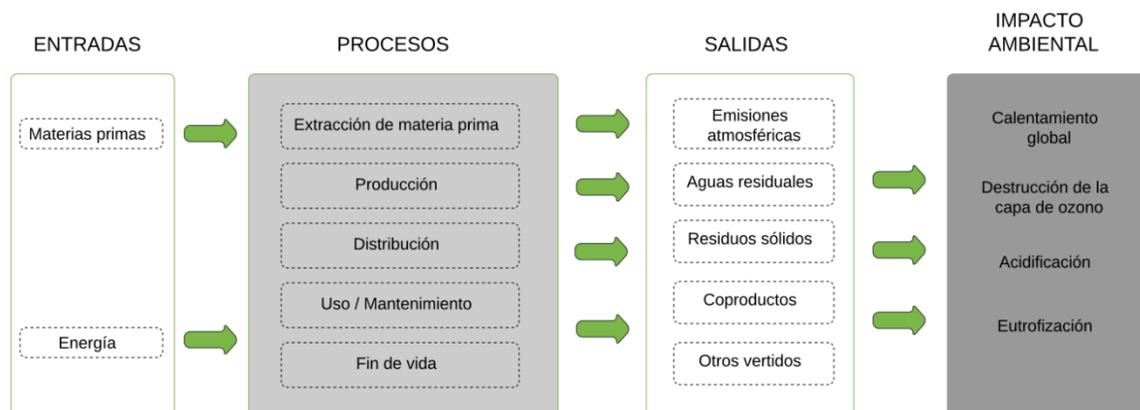
- Búsqueda de documentos.
 - Literatura existente de fibras de fique y fibras naturales aplicadas en el reforzamiento del concreto.
 - Literatura existente acerca de fibras sintéticas aplicadas en el reforzamiento del concreto.
 - Producción de las fibras de fique en el país.
 - Estudio descriptivo acerca de la extracción y obtención de la fibra de fique y la fibra de polipropileno como materia prima.
 - Caracterización morfológica de las fibras de fique.
 - Composición química de las fibras de fique.
 - Revisión de literatura acerca de la caracterización química y mecánica de la fibra de fique, con el fin de evaluar el impacto ambiental de su proceso de tratamiento.
 - Ahorro ambiental por el uso de fibras de fique en el desarrollo de materiales sostenibles en la construcción.
- Selección de documentos
 - Categorización de la información.
 - Agrupación o tabulación de la información.
- Evaluación de la calidad de los documentos
 - Índice de impacto
 - Bases de datos internacionales multidisciplinaria y especializada
 - Editorial u organización que publica la investigación.
 - Actualidad de la información
 - Objetivo de la publicación y audiencia a la que va dirigida
 - Objetividad, precisión y exactitud
 - Originalidad, exhaustividad y cobertura
 - Organización y estructuración de la información
 - Calidad de la expresión y de las ilustraciones, tablas, mapas y figuras
 - Año de publicación

- Revisión de la bibliografía
- Extracción de datos
 - Motores de búsqueda, Scopus, ScienceDirect, ASCEILibrary, SciElo, Google.
- Síntesis de datos
 - Técnica comparativa para la selección de la información
 - Identificación de datos sobresalientes e información relevante
 - Organización de la información
 - Utilización de los resultados para construir un instrumento cuantitativo.
 - Administración del instrumento a una muestra para validarlo.

En esta primera fase, se realizó la revisión de literatura sistemática acerca del estado del arte de las fibras naturales aplicadas en concreto, como también la revisión de literatura de las fibras de polipropileno.

Para identificar las ventajas técnicas y ambientales de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno, en la búsqueda de literatura, se tuvo en cuenta el aspecto ambiental. Es decir, se establecieron criterios ambientales según la normativa ISO 14044 – 1040 2007 de gestión medioambiental, y según el estado del arte de las fibras de fique y las fibras de polipropileno.

El análisis de ciclo de vida recopila y evalúa las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales, del conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente durante la vida útil del producto, desde que se obtiene la materia prima hasta la eliminación del producto (Serrano, 2014).

Figura 0-3. Etapas del ciclo de vida del producto ISO 14044 2007.

Fuente: Autor (2020).

1.16 Fase 2 de la investigación

Para evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de las fibras de fique como refuerzo en el concreto, en el segundo objetivo de la investigación, fue ineludible establecer criterios de las cualidades de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno para su aplicación como material de refuerzo en concreto, criterios que fueron establecidos según la revisión de literatura realizada en la primera fase de la investigación.

En esta fase se realiza el análisis cuantitativo del estado del arte.

- ✓ Establecer criterios según la literatura existente de las cualidades físicas y mecánicas que debe tener la fibra de fique para su aplicación como material de refuerzo.
- ✓ Identificar el impacto ambiental del proceso de cultivo y obtención de la fibra de fique. Existen muchas técnicas de extracción de fibras naturales, como los procesos mecánicos, semi mecánicos, químico mecánico, termo mecánico y químicos.
- ✓ Identificar el impacto ambiental del proceso de industrialización de las fibras de polipropileno.
- ✓ Analizar las propiedades mecánicas de la fibra de fique establecidas por otros autores, específicamente la resistencia a la tensión (σ) y el módulo de elasticidad en tensión (E). Estudio de la porosidad del material, resistencia a la inflamación,

impermeabilidad. Esto con el fin de realizar el estudio comparativo con la fibra de polipropileno.

- ✓ Identificar las propiedades mecánicas de la fibra sintética de polipropileno. Específicamente, la resistencia a la tensión (σ_u) y el módulo de elasticidad en tensión (E). Estudio de la porosidad del material, resistencia a la inflamación, impermeabilidad. Esto con el fin de realizar el estudio comparativo con la fibra de polipropileno.
- ✓ Analizar los resultados cuantitativos.
- ✓ Identificar patrones.
- ✓ Establecer criterios para el análisis de ciclo de vida del material.
- ✓ Analizar el ciclo de vida de la fibra de fique vs. la fibra de polipropileno.

Con el análisis de los resultados cuantitativos obtenidos se pudo evaluar la viabilidad técnica de la fibra de fique para su aplicación como material de refuerzo en concretos. A causa de la necesidad ambiental de utilizar materiales renovables, fue necesario evaluar la viabilidad de dicha fibra teniendo en cuenta el ciclo de vida de esta.

La vida de un material o producto inicia en el diseño y desarrollo del producto y finaliza al final de vida de las actividades (reutilización, reciclaje, etc.) (Norma ISO 14040). Por tal motivo, el análisis se realizó desde las siguientes etapas.

- ✓ Adquisición de materia prima
- ✓ Proceso y fabricación
- ✓ Uso de energía y uso de agua
- ✓ Potencial de huella de carbono
- ✓ Impacto sobre los recursos renovables
- ✓ Potencial de acidificación
- ✓ Toxicidad

Se desarrolló un estudio de ciclo de vida “de la cuna a la puerta”, evaluando cada una de las etapas de la fibra de fique como de la fibra de polipropileno, con el fin de identificar el impacto ambiental que podría causar la utilización de cada una de estas, y así establecer las ventajas y desventajas de cada fibra.

Los criterios del análisis de ciclo de vida establecidos fueron realizados conforme a las etapas del análisis de ciclo de vida según la ISO 14040 2007, para lo cual fue necesario establecer el objetivo y el alcance del estudio, realizar el inventario del ciclo de vida (ICV) donde se identificó y cuantificaron todas las entradas (consumo de recursos y materiales) y salidas (emisiones al aire, suelo, aguas y generación de residuos), todo aquello que pudiera generar un impacto durante el ciclo de vida del material. Los datos que se obtuvieron en este inventario fueron la base para evaluar el impacto del ciclo de vida de las fibras.

Después de identificar el inventario, se desarrolló la evaluación de los impactos del ciclo de vida (EICV). En esta etapa se relacionaron las entradas y salidas seleccionadas en el inventario con los impactos que estos pudieran ocasionar sobre el medio ambiente y los recursos. Se llevó a cabo la clasificación y caracterización de los resultados obtenidos en el inventario, entradas y salidas que fueron clasificadas en diferentes categorías, según su nivel de impacto en el medio ambiente.

Una vez caracterizados y clasificados los resultados obtenidos, estos fueron normalizados y ponderados. Por último, con la combinación de los resultados que se obtuvieron en él (ICV) y la (EICV), conforme al objetivo y al alcance planteados, se presentaron las conclusiones y las recomendaciones.

El análisis de ciclo de vida realizado según la normativa ISO 140040 e ISO 14044 se centró en el consumo de recursos y los impactos ambientales que se generan en la etapa de “la cuna a la puerta” del material. Para el estudio realizado se desarrolló una metodología mostrada en la figura 3-4, tomando como referente la normativa anteriormente mencionada.

Con el resultado del análisis de ciclo de vida realizado a las fibras de fique y las fibras de polipropileno, se obtuvieron los datos para el análisis comparativo entre las fibras con el fin de establecer las ventajas competitivas de una frente a la otra.

1.17 Fase 3 de la investigación

✓ **Reporte final.**

El reporte final consistió en la interpretación y análisis de los resultados obtenidos en el análisis de ciclo de vida desarrollado a las fibras de fique y las fibras de polipropileno. Esto permitió identificar la viabilidad técnica y ambiental del uso de fibras de fique como también la identificación del impacto ambiental que genera las fibras de polipropileno.

De manera que, se establecieron las ventajas ambientales que tienen las fibras de fique como material renovable, para su aplicación como material de refuerzo en concretos.

✓ **Análisis comparativo técnico y ambiental, entre la fibra de fique vs. la fibra de polipropileno.**

El análisis comparativo fue realizado con los datos obtenidos del ACV de la fibra de fique y la fibra de polipropileno. Conforme a los datos se realizó un análisis cuantitativo de los impactos que cada una genera en el medio ambiente, además de evaluar y comparar las propiedades físicas y mecánicas que tiene cada una, como unidad, aplicada como material de refuerzo en el concreto.

✓ **Validación interna y externa y validación de la confiabilidad de los datos cualitativos y cuantitativos obtenidos.**

Para la validación de los datos obtenidos de la revisión de literatura sistemática, se desarrolló un protocolo de selección de estudios, para lo cual se establecieron criterios de inclusión y exclusión, y así mitigar el sesgo y el error aleatorio, de modo que dicha información fue validada mediante el análisis cuantitativo de los resultados obtenidos, apoyado en el desarrollo del meta-análisis.

✓ **Conclusiones.**

Las conclusiones que se realizaron fueron basadas en la interpretación de los datos obtenidos en el análisis de ciclo de vida de las fibras, el análisis cualitativo de la revisión sistemática de literatura, y el análisis cuantitativo (meta-análisis), el cual fue realizado mediante el apoyo del software denominado RevMan.

✓ **Recomendaciones**

Para las recomendaciones, se realizó el análisis de los artículos referentes seleccionados, tomando las recomendaciones de los investigadores, los cuales concluyen que hace falta

desarrollar mayores investigaciones en diferentes temas del campo de las fibras naturales para que estas puedan ser aplicadas en concretos, ya sea para uso estructural o no estructural.

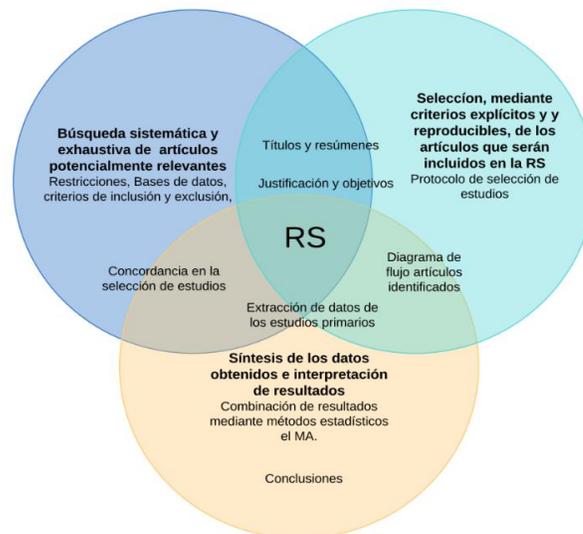
Dichas recomendaciones fueron unas de las conclusiones de esta investigación, ya que con la revisión de literatura se pudo evidenciar el vacío del conocimiento que existe lo cual no ha permitido la aplicación de las fibras naturales como material de refuerzo en concretos.

Con esto, se contribuye a que los investigadores puedan identificar en la presente investigación los estudios que hacen falta desarrollar, y así motivar a los investigadores a realizar mayores estudios en dicho campo, y de este modo, consolidar la aplicación de dichas fibras como material renovable en la industria de la construcción.

1.18 Diseño de instrumentos

Para dar respuesta a la pregunta de investigación, se desarrolló una revisión sistemática de literatura para lo cual se sintetizaron investigaciones primarias mediante estrategias de búsqueda que ayudaron a limitar el sesgo y el error aleatorio.

Figura 0-4. Etapas de la revisión sistemática de literatura



Fuente: Autor. Basado en la literatura de revisiones sistemáticas y metaanálisis de (González, Urrútia, & Coello, 2011).

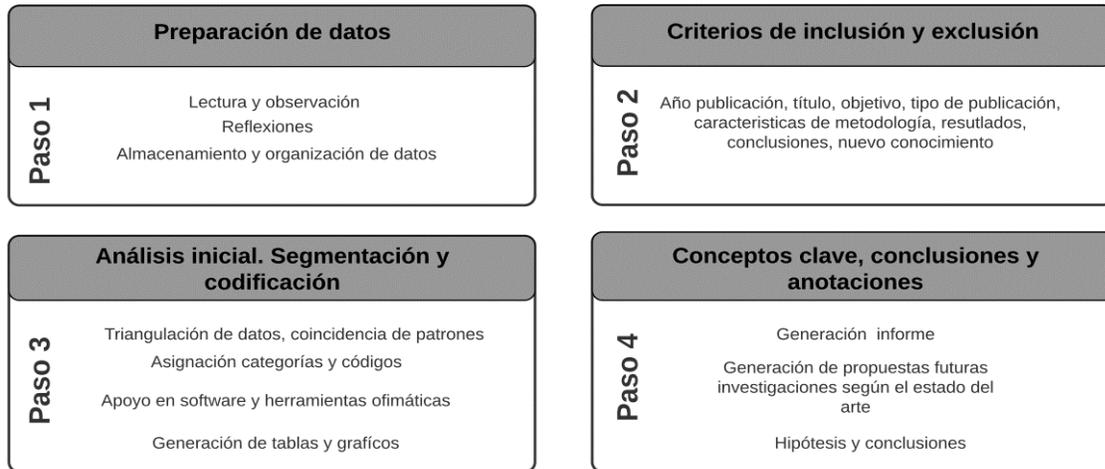
Para el desarrollo del meta-análisis fue necesario realizar una búsqueda estructurada y explícita de artículos de investigación publicados y no publicados, en bases de datos indexadas y no indexadas, teniendo en cuenta diferentes factores como las referencias bibliográficas, fuentes de información, idioma, año de publicación, entre otros. La selección fue fundada en criterios explícitos aplicados monótonamente a todos los artículos, y la síntesis del estudio fue basada en un resumen cualitativo y cuantitativo de los estudios seleccionados.

El protocolo de selección de estudios se desarrolló teniendo en cuenta como criterios de inclusión y exclusión el año de publicación, idioma, tipo de publicación (artículos y tesis), objetivos, justificación, características de la metodología del estudio, resultados, conclusiones de la investigación, conocimiento nuevo de la investigación. (Ver anexos, Tabla 6 Hoja de protocolo de selección de estudios).

1.19 Análisis de datos

Hernández y otros (2014), consideran que en el proceso cuantitativo primero se recolectan los datos y luego se analizan, mientras que, en la investigación cualitativa, se recolectan los datos y se analizan en paralelo. El estudio de caso simple contempló los dos aspectos, cuantitativo y cualitativo, para lo cual se utilizaron diferentes fuentes de búsqueda con el fin de realizar la triangulación de los datos.

Para el análisis de los datos se tomó como referente la literatura de metodología de investigación de Sampieri et al. (2014), de modo que los datos obtenidos se estructuraron, organizándolos por categorías, y según el tipo de estudio y resultado de la investigación, e identificando los conceptos, teorías y patrones presentes en los datos, a fin de otorgarles sentido, y así interpretarlos y explicarlos, generando hipótesis en función del planteamiento del problema de la presente investigación. Comprender a profundidad el resultado de la investigación, junto con el vacío del conocimiento existente que da origen a las nuevas investigaciones que deben ser desarrolladas para poder consolidar el uso de fibras vegetales en la industria de la construcción; vinculando los resultados con el estado del arte, y así generar una teoría fundamentada en los datos obtenidos.

Tabla 0.1 Proceso análisis de datos cualitativos

Fuente: Autor (2020).

Recolección de la información

En este capítulo se muestra la base de datos necesaria para el desarrollo del análisis del ciclo de vida comparativo entre las dos fibras, con el apoyo de la base teórica plasmada en el documento, la normativa técnica colombiana ISO 14040 e ISO 14044 de 2007, y el apoyo del Software GaBi, con el fin de dar respuesta a los objetivos propuestos de la investigación.

Los datos del inventario, tomados de diferentes estudios relacionados con el tema a nivel mundial y local; así como los datos suministrados por las diferentes bases de datos que ofrece el software GaBi, detallados en la fase del inventario (ICV), permitieron hacer el inventario de cada uno de los subsistemas para el desarrollo del ACV, dando respuesta al objetivo principal de la investigación: determinar los impactos ambientales positivos y negativos que genera la fibra de fique vs. la fibra de PP.

Por otra parte, la recolección de la información permitirá conocer las ventajas y desventajas que tiene la una frente a la otra, por medio de los resultados del análisis de ciclo de vida, lo cual no sería posible sin esa recolección de datos que se requieren para conocer las entradas y salidas necesarias para el ACV.

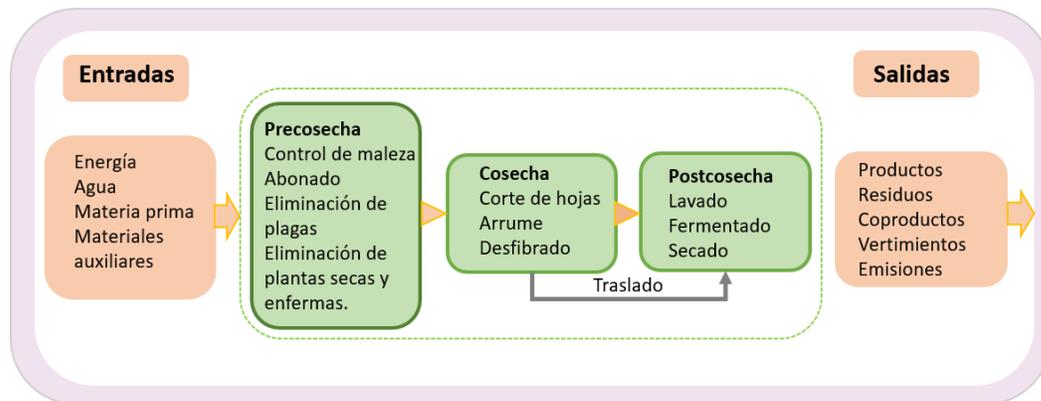
En razón de que el ACV a desarrollar será de “la cuna a la puerta”, para poder determinar los impactos ambientales en esta fase, es necesario describir y conocer lo que conlleva la obtención de la materia prima, el transporte a fábrica, y el proceso de obtención o fabricación de cada una de las fibras. Así, el capítulo 4 contribuye al cumplimiento de los objetivos del estudio.

1.20 Descripción del proceso de elaboración de la fibra de fique

Para poder evaluar ambientalmente las fibras de fique, como se mencionó anteriormente, fue necesario conocer el proceso de cultivo del fique junto con su proceso de manufactura para así identificar las entradas y las salidas.

Es importante tener en cuenta que las actividades que se llevan a cabo durante la producción de fique, que son manuales, no demandan insumos diferentes de las herramientas básicas de trabajo, como los guantes y machetes, entre otros de uso común. De allí que los impactos ambientales se consideraron de mínimo efecto. Entre las actividades, están la siembra, el hoyado, abonado e incluso, el corte de hojas.

Figura 0-1. Entradas y salidas ACV fibras de fique.



Fuente: Autor (2020).

Por otra parte, en la actividad de desfibrado, se requiere de un equipo que funciona con motor a Diesel y, por ende, genera impactos como consumo de combustible y emisión de gases de combustión.

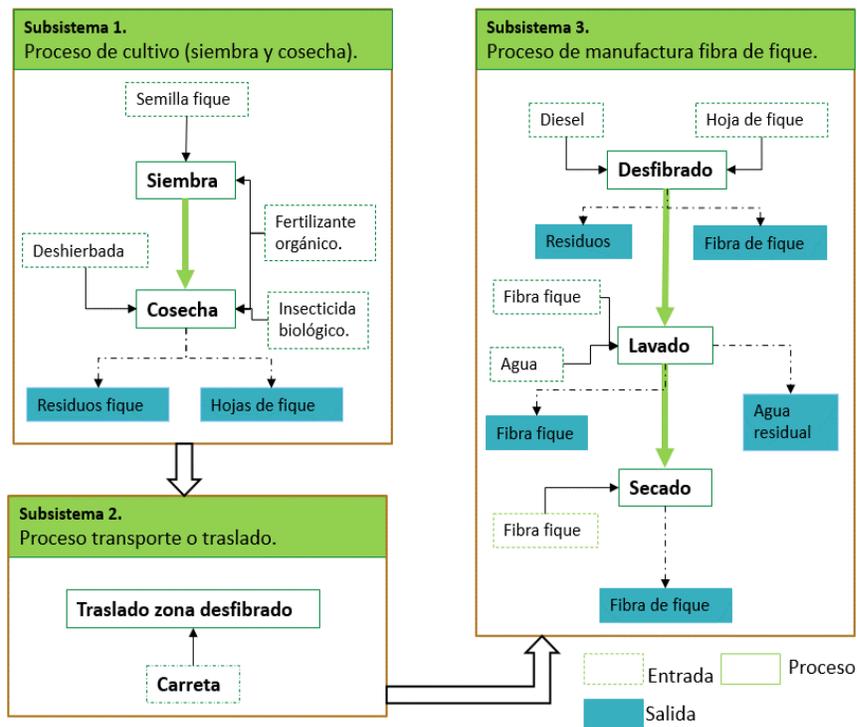
El primer subsistema consiste en el proceso de cultivo del fique, para lo cual no se requiere gran cantidad de insumos. En esta etapa principalmente se requiere el uso de 960 semillas para obtener 1320 kg de fibra de fique, es decir, que se requieren 1,37 semillas y/o plantas para producir 1 kg de fique, 500 gramos de abono orgánico por planta y 1,50 kg de insecticida biológico por hectárea (Fenalfique, 2019).

En el segundo subsistema, realmente no se requieren insumos, ya que es trasladado por el hombre, ya sea sobre su hombro o con la ayuda de una carreta. De este modo, se realiza normalmente.

El tercer subsistema consiste en la etapa de manufactura de la fibra, la cual consiste en introducir la hoja de fique por una máquina desfibadora que requiere de 3,0 galones de combustible por día, la máquina tiene un rendimiento de 80 a 120 kg al día, es decir, que se requieren de 11 días para producir 1320 kg de fibra de fique (CORPOCAUCA, 2007).

Finalmente, después de obtener la fibra, esta se introduce en un tanque de plástico con 1 m³ de agua, se deja en ella por 12 horas, y al día siguiente se retira del agua; se sacude, y se extiende al aire libre para que esta seque. Para el presente estudio, se tomaron como referentes los datos anteriormente mencionados, y se calculó la cantidad necesaria de cada insumo para la producción de 1 kg de fibras de fique.

Figura 0-2. Diagrama de ciclo de vida de la fibra de fique.



Fuente: Autor (2020).

Para el ACV de las fibras de fique no se tuvo en cuenta el proceso de traslado, ya que normalmente la máquina desfibadora se encuentra cerca de la zona de cultivo.

Tabla 0.1 Inventario ACV de la producción de 1 kg de fibras de fique.

Entrada/Salida	Insumos	Cantidad	Unidad	Observaciones
Proceso 1: Cultivo				
Entrada	Tierra arable	2	m ²	Datos tomados de estudio de referencia (Fenalfique, 2019).
Entrada	Abono orgánico	1000	g	
Entrada	Insecticida biológico	0.003125	kg	
Entrada	Semillas de fique	2	mg	
Salida	Desechos de la hoja de fique	0.1	kg	
Salida	Hojas de fique	1.9	kg	
Entrada/Salida	Insumos	Cantidad	Unidad	Observaciones
Proceso 2: Obtención de la fibra				
Entrada	Hojas de fique	1.9	kg	(Espín & Tello, 2015), (Fenalfique, 2019).
Entrada	Diesel	0.215	lt	
Salida	Residuos	0.9	kg	
Salida	Dióxido de carbono	0.57	kg	
Salida	Fibras de fique	1	kg	
Entrada/Salida	Insumos	Cantidad	Unidad	Observaciones
Proceso 3: Lavado de las fibras				
Entrada	Fibras de fique	1	kg	(Fenalfique, 2019).
Entrada	Agua	4.5	lt	
Salida	Agua residual	4.27	lt	
Salida	Fibras de fique	1	kg	
Entrada/Salida	Insumos	Cantidad	Unidad	Observaciones
Proceso 4: Secado de las fibras				
Entrada	Fibras de fique	1	kg	(Fenalfique, 2019).
Entrada	Alambre calibre 12	3	ml	
Entrada	Madera 15 x 15 x 1.80	3	ml	
Salida	Fibras de fique	1	kg	

Fuente: Autor (2020).

Estos materiales son consumidos cada vez que se fabrica 1 kg de fibras de fique, a excepción del alambre y la madera.

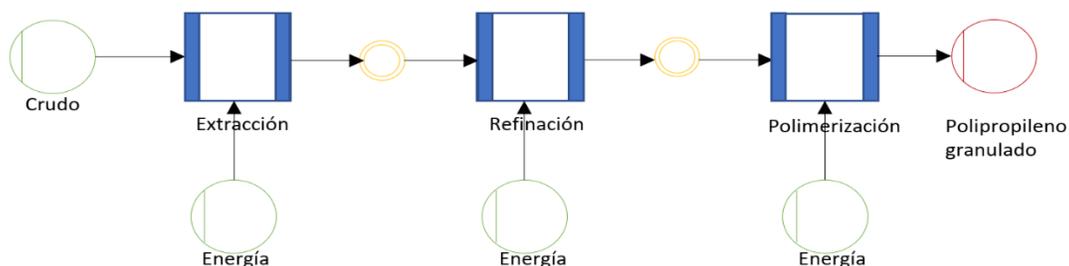
Tabla 0.2 Etapas del proceso de manufactura de la fibra de fique.

Etapa del proceso	Actividad	Descripción	Fuente
Siembra y cosecha de fique	Siembra	Esta actividad se realiza con buenas prácticas agrícolas, solo se utiliza la mano de obra.	(Fenalfique, 2019).
	Deshierbada	Es realizada igualmente por el hombre con herramientas menores.	
	Fertilizante orgánico	Residuo orgánico vegetal de restos de cosechas.	
	Insecticida biológico	Elaborado respetando el medio ambiente y la salud humana. Compuesto por plantas, aceites vegetales y un activo no químico que determinara sus efectos.	
Desfibrado	Maquina desfibradora	La máquina desfibradora normalmente está a menos de 10 m de distancia del cultivo. La máquina funciona con combustible diesel.	(Espín & Tello, 2015), (Fenalfique, 2019).
Procesamiento	Lavado	El lavado se realiza en tanques plásticos, para 1 kg de fique se requiere 9.17 litros de agua sin embargo, el lavado se realiza 3 veces. Es decir que se requieren 27.51 litros de agua.	(Mosquera & Morales, 2008)

Fuente: Autor (2020).

1.21 Descripción del proceso de elaboración de la fibra de polipropileno

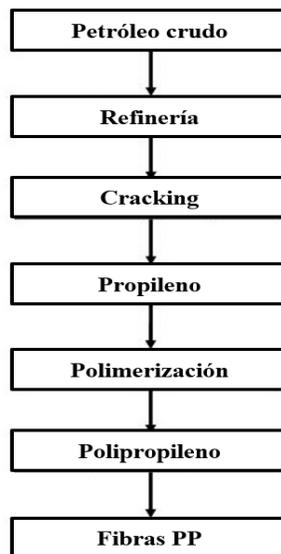
El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico comercial, semicristalino, blanco, semiopaco, obtenido a través del propileno. El propileno a temperatura ambiente y a presión atmosférica se encuentra en estado gaseoso y, al igual que otros alquenos, es incoloro. Se presenta en la naturaleza como consecuencia de los procesos de vegetación y fermentación. La principal fuente de propileno es la refinación del petróleo (Amaya et al., 2018). El polipropileno se sintetiza por la polimerización.

Figura 0-3. Sistema de producción del polipropileno granulado.

Fuente: (Castaño & Botero, 2017)

El proceso de producción de gránulos de PP genera 1,56 kg eq. de CO₂ por kg en cuanto a materia prima, un valor inferior al dato reportado por la base de datos de ECOINVENT “polypropylene, granulate at plant [RER]” que es de 1,98 kg eq. de CO₂ y 2,17 kg eq. de CO₂ reportado por la sociedad australiana de análisis de ciclo de vida. Es decir, que la huella de carbono analizada por Castaño y Botero está por debajo 20% al estándar internacional, lo que se podría sustentar en el uso eficiente de la energía y en que la electricidad en Colombia se genera en un 64% a partir de hidroeléctricas, fuente de electricidad con menor huella que otras fuentes (Castaño & Botero, 2017).

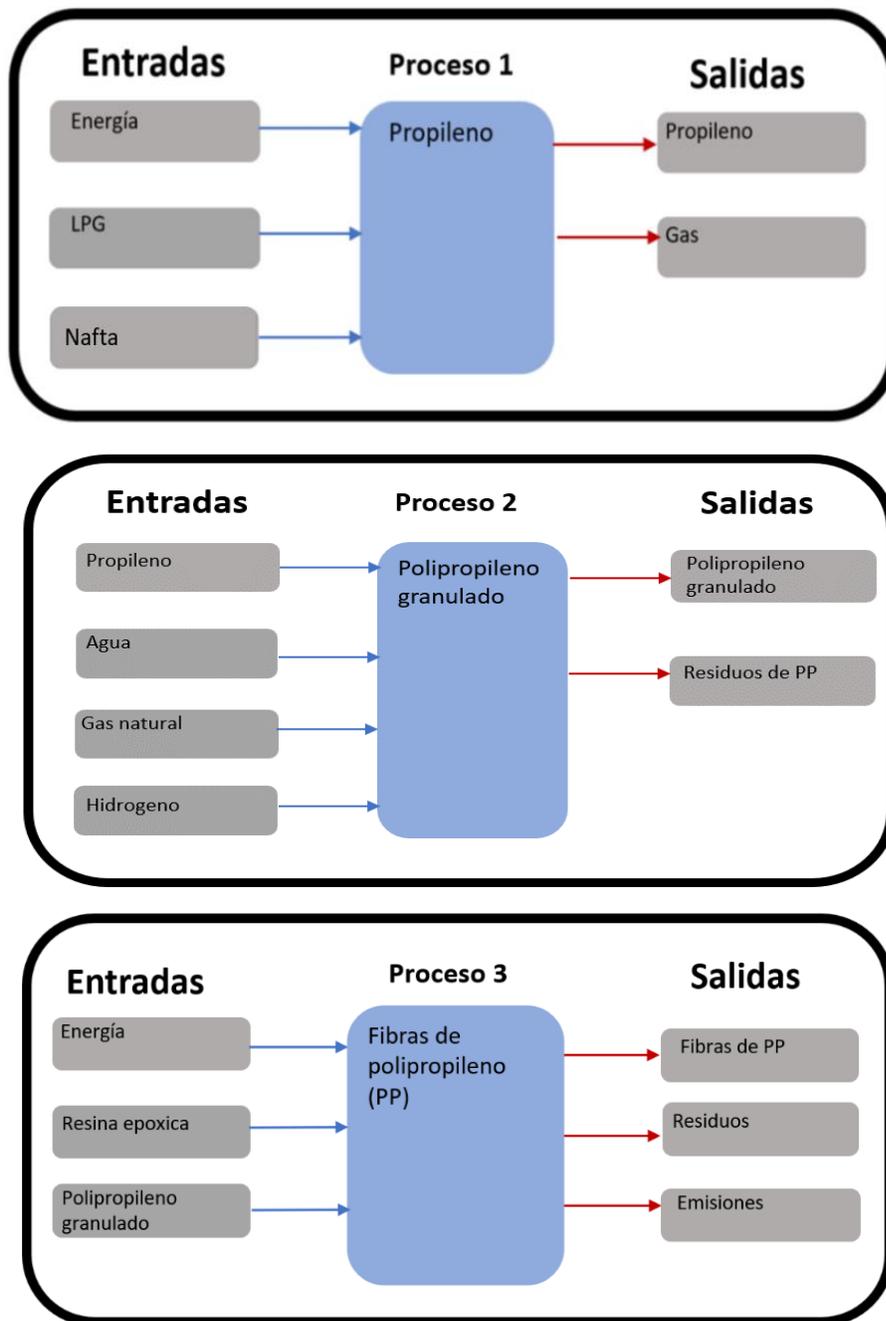
Figura 0-4. Diagrama producción de fibras de polipropileno.



Fuente: (GaBi software, 2019).

En efecto, la base para la producción de polipropileno es el petróleo crudo. El polipropileno se polimeriza a partir de propeno (propileno), que se extrae craqueando nafta o gasóleo en un craqueador de vapor. El PP se produce en un proceso de baja presión.

Para la obtención de las fibras, el PP es sometido al proceso de hilado de fibras de polipropileno y el tratamiento de la superficie con un agente de encolado. La demanda de energía está entre 1 y 3 MJ por kilogramo de polipropileno. Esta información fue tomada de la base de datos de GaBi, la cual, también está referenciado por (Korol et al., 2020).

Figura 0-5. Entradas y salidas del ACV de las fibras de polipropileno.

Fuente: Autor (2020).

Tabla 0.3 Inventario ACV fabricación de 1 kg de fibras de polipropileno.

Entrada/Salida	Insumos	Cantidad	Unidad	Observaciones
Proceso 1: Propileno				
Entrada	Bio-based naphtha	2.67	kg	(Oficina Catalana del Canvi Climàtic, 2011) - (Moretti, Junginger, & Shen, 2020)
Entrada	LPG	0.63	kg	
Entrada	Energía	1	mj	
Salida	Propileno	1	kg	
Salida	Gas	2.9	kg	
Salida	Dióxido de carbono de origen fósil	2	kg	
Entrada/Salida	Insumos	Cantidad	Unidad	Observaciones
Proceso 2: Polipropileno granulado				
Entrada	Propileno	1.2	kg	(Mannheim & Simenfalvi, 2020), (Brogaard, Damgaard, Jensen, Barlaz & Christensen, 2014), (Yin, 2015)
Entrada	Agua	42	lt	
Entrada	Hidrogeno	1	kg	
Entrada	Gas natural	1	kg	
Salida	Dióxido de carbono	1.2	kg	
Salida	Polipropileno granulado	1	kg	
Salida	Dióxido de carbono	0.01	kg	
Salida	Residuos PP	0.2	kg	
Entrada/Salida	Insumos	Cantidad	Unidad	Observaciones
Proceso 3: Obtención fibra de PP				
Entrada	Polipropileno granulado	1	kg	Base de datos GaBi Software
Entrada	Mezcla red eléctrica	2	mj	
Entrada	Resina epoxica	1	kg	
Salida	Fibras de PP	1	kg	
Salida	Residuos PP	0.05	kg	
Salida	Dióxido de carbono	0.05	kg	

Fuente: Autor (2020).

Para el análisis de ciclo de vida se tomaron los datos de la literatura y de la base de datos de GaBi, realizándose desde el proceso de obtención del propileno, materia prima necesaria para la creación del polipropileno granulado. Sin embargo, para futuras investigaciones sería importante desarrollar el ciclo de vida de las fibras desde el proceso de extracción del LPG y toda la materia prima que se requiere para crear el polipropileno.

1.22 Triangulación de los datos

La triangulación de datos es útil para someter a control recíproco los datos aportados por distintos informantes, por distintas técnicas y por el investigador. Permite la profundización del estudio y una mayor comprensión, dado que el cruce de distintos métodos genera fuentes de datos complementarias. Aumenta también la exactitud, tanto en la recolección como en el análisis de los datos (Grieco, 2012).

Para el desarrollo de la triangulación de los datos de la presente investigación, se consideró la literatura con resultados cualitativos y cuantitativos de investigaciones existentes en fibras de fique y fibras de polipropileno. En cuanto a los datos obtenidos de las fibras, se analizaron los datos técnicos obtenidos por otros investigadores, en cuanto a la resistencia a la flexión y compresión como material de refuerzo en concreto.

También, se realizó un análisis de los datos recolectados, con base en los impactos ambientales de las fibras de polipropileno, por otros investigadores, y así poder compararlos con los resultados que se obtuvieron en la presente investigación. Esto solo fue posible realizarlo con la fibra de PP, ya que aún no existen estudios acerca del ciclo de vida de las fibras de fique ni de los impactos asociados a su producción o utilización como material de refuerzo en concretos.

Si bien las fibras de fique como adición aumentan la absorción de energía y deformación del concreto tras someterse al ensayo de flexión, la fibra actúa además como una red que reduce la tendencia del concreto a fracturarse violentamente al llegar al esfuerzo de falla en compresión, tensión indirecta y flexión (Pinto & Figueroa, 2016).

Por consiguiente, con el análisis de la literatura existente en fibras de fique se identificó que Barbosa & Mayorga (2015), obtuvieron una resistencia a la compresión de 20,93 MPa, la cual superó la muestra control, comprobando que dichas fibras no afectan la resistencia a compresión del concreto.

Respecto a la resistencia a flexión, estas fibras superan la muestra control en un 31% según Bohórquez (2011), sin embargo, no obtuvo un porcentaje mayor en cuanto a la resistencia a la compresión del concreto. Al contrario, dicha resistencia llegó a un 86% de la resistencia total comparada con el concreto simple.

Tabla 0.4 Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras fique comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.

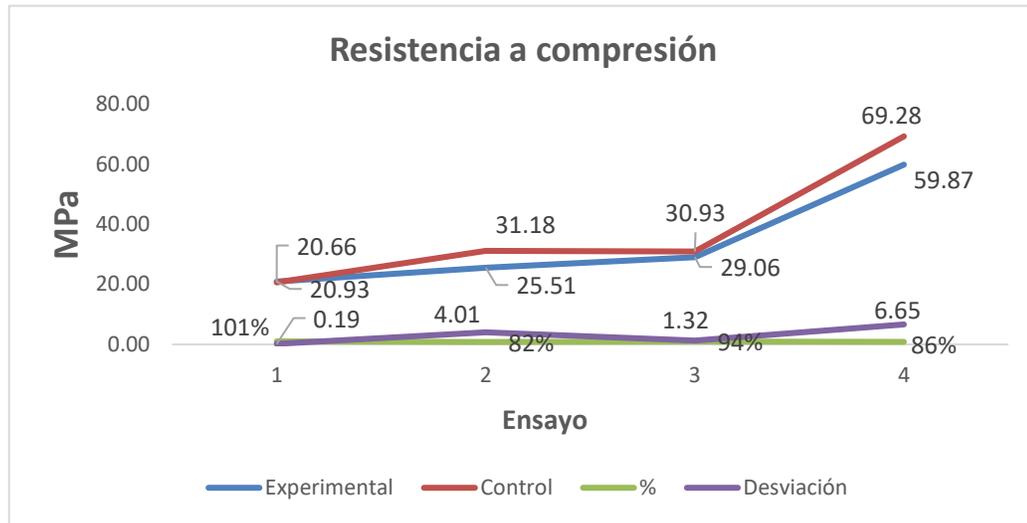
ENSAYO			COMPRESIÓN			
Autor	Fibra	#	Experimental MPa	Control MPa	%	Desviación
Barbosa, Mayorga, 2015	Fique	1	20.93	20.66	101%	0.19
Pinto & Figueroa, 2016	Fique	2	25.51	31.18	82%	4.01
Pinzón, 2013	Fique	3	29.06	30.93	94%	1.32
Bohórquez, 2011	Fique	4	50.87	69.28	86%	6.65

Fuente: Autor (2021).

Como se muestra en la tabla 4.4, de acuerdo con la literatura existente, se identificó que las fibras de fique son viables para concretos con resistencia de 2000 psi, 3000 psi y 4000 psi, ya que su resistencia a compresión, aunque se ve afectada por la adición de dichas fibras, para algunos investigadores el impacto no ha sido significativo.

Sin embargo, se considera que para poder determinar su viabilidad técnica comparado con el concreto simple, es necesario realizar más investigaciones.

Figura 0-6: Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de fique comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.



Fuente: Autor (2021).

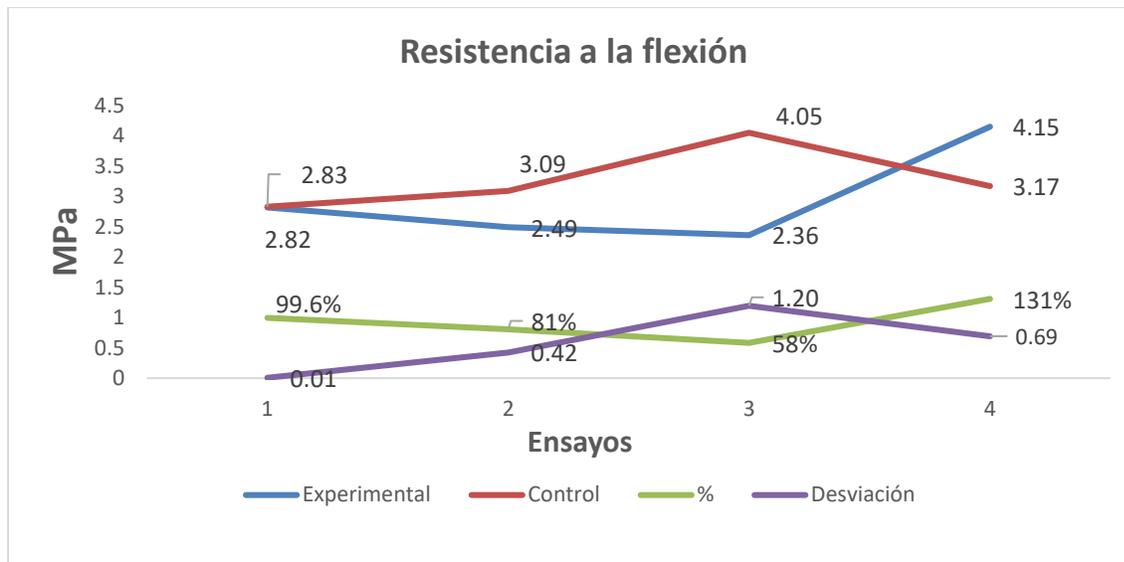
A continuación, se muestra en la tabla 4.5, los resultados de cuatro estudios que se tienen hasta el momento, donde uno de estos supera la resistencia control a flexión en un 31%. Respecto a la resistencia control a compresión se cumple con el 100%, sin embargo, dos de estos estudios obtienen una resistencia de 18% y 14% por debajo de la resistencia control. Dado los resultados, es posible definir que, dos de los cuatro resultados, obtienen la resistencia de diseño, pese a que no se supera en una de ellas la muestra control.

Tabla 0.5 Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.

ENSAYO			FLEXIÓN			
Autor	Fibra	#	Experimental MPa	Control MPa	%	Desviación
Barbosa, Mayorga, 2015	Fique	1	2.82	2.83	99,6%	0.01
Pinto & Figueroa, 2016	Fique	2	2.49	3.09	81%	0.42
Pinzón, 2013	Fique	3	2.36	4.5	58%	1.20
Bohórquez, 2011	Fique	4	4.15	3.17	131%	0.69

Fuente: Autor (2021).

Figura 0-7. Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.



Fuente: Autor (2021).

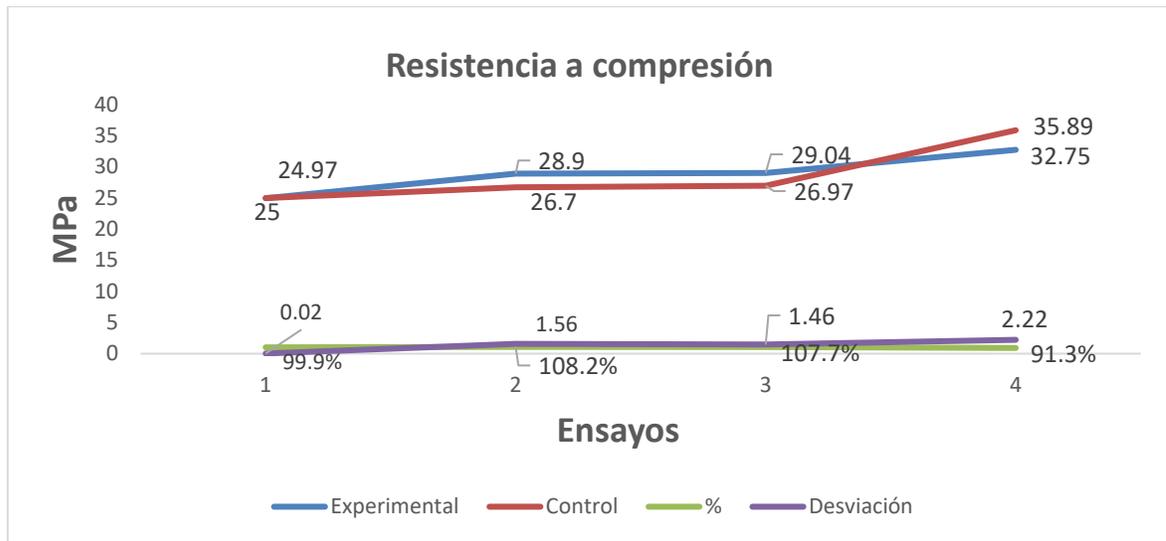
A continuación, en la siguiente tabla, se muestra la resistencia a compresión del concreto simple vs. el concreto adicionado con fibras de polipropileno, donde se pudo identificar que, dos de los cuatro estudios superan en un 8% la muestra control, uno cumple al 99,9% y el otro llega al 91% en cuanto a la resistencia a compresión.

Tabla 0.6 Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de polipropileno comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.

ENSAYO			COMPRESIÓN			
Autor	Fibra	#	Experimental MPa	Control MPa	%	Desviación
Vega, 2019	PP	1	24,97	25	99,9%	0,02
Sika, 2012	PP	2	28,9	26,7	108%	1,56
Govindasami, Sakthivel & Harish, (2018)	PP	3	29,04	26.97	107,7%	1,46
Mendoza, Aire & Dávila, 2011	PP	4	32,75	35,89	91%	2,22

Fuente: Autor (2021).

Figura 0-8. Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de polipropileno comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.



Fuente: Autor (2021).

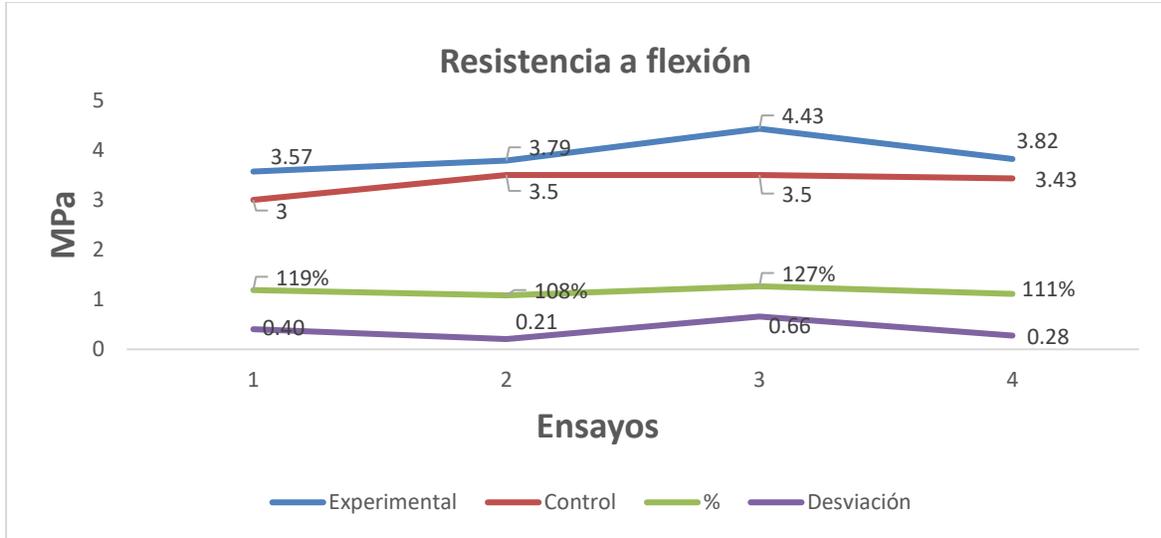
Respecto a la resistencia a flexión en la table 4.7, se evidencia que las fibras de polipropileno generan mejores beneficios al concreto, ya que todas las muestras superaron la resistencia de control, y una de estas la superó en un 27%, esto comparado con la resistencia a flexión del concreto simple.

Tabla 0.7 Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de polipropileno comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.

ENSAYO			FLEXIÓN			
Autor	Fibra	#	Experimental	Control	%	Desviación
Vega, 2019	PP	1	3,57	3	119%	0,40
Sika, 2012	PP	2	3,79	3,5	108%	0,21
Govindasami, Sakthivel & Harish, (2018)	PP	3	4,43	3,5	127%	0,66
Mendoza, Aire & Dávila, 2011	PP	4	3,82	3,43	111%	0,28

Fuente: Autor (2021).

Figura 0-9. Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de polipropileno comparada con la resistencia a compresión del concreto simple.



Fuente: Autor, (2021).

1.22.1 Emisiones de dióxido de carbono de la fibra de polipropileno

Un estudio desarrollado por Korol, Hejna, Burchart y Wachowicz demostró que, durante la fabricación de polipropileno, el impacto más significativo en el medio ambiente lo demuestra el monómero y uso de electricidad. El primer factor afecta principalmente al carbono y huellas ecológicas (más del 66%), mientras que, para la huella hídrica, la más agravante es la segunda. Juntos, independientemente de la huella, su participación supera el 84% del impacto total. Ver tabla 4.8.

Tabla 0.8 Huellas ambientales de componentes particulares del sistema de producción de polipropileno.

Component of the Production System	Carbon Footprint		Ecological Footprint		Water Footprint	
	kg CO ₂ e/kg PP	%	m ² ·a/kg PP	%	m ³ /kg PP	%
Electricity	0.60	18	1.49	18	0.0356	60
Propylene	2.33	68	5.52	66	0.0219	37
Heat, oil	0.28	8	0.73	9	0.0010	2
Heat, gas	0.22	6	0.56	7	0.0005	1
Total	3.43	100	8.31	100	0.0590	100

Fuente: (Korol et al., 2020).

En el caso del óxido nitroso, las emisiones indirectas se asocian a la generación eléctrica, mientras que las mayores emisiones de óxido nitroso se producen en la producción del propileno de polimerización de monómeros. Este componente es el mayor responsable de la mayor emisión de metano y bromotrifluorometan. Las emisiones de gases de efecto invernadero en el sistema de producción de polipropileno provienen de procesos de generación de calor durante la combustión de gasóleo de calefacción y gas de refinería (Korol et al., 2020).

Tabla 0.9 Emisiones de dióxido de carbono por kg de polipropileno.

Emisión CO ₂	Fuente
1.98 kg eq. CO ₂	Ecoinvent, (Castaño & Botero, 2017)
2.17 kg eq. CO ₂	Sociedad Australiana de análisis de ciclo de vida, (Castaño & Botero, 2017)
3.43 kg eq. CO ₂	(Korol, J, Hejna, A, Burchart, D, Wachowicz, 2020)

Fuente: Autor (2021).

Según las investigaciones realizadas por otros autores, como los mencionados en la tabla 4.9, las fibras de polipropileno en su fase de la cuna a la tumba generan de 1.98 kg eq. de CO₂ a 3.5 kg eq. de CO₂ a la atmosfera.

Por otra parte, el análisis de los impactos ambientales de las fibras de polipropileno vs. las fibras de fique, no se debe limitar a indicadores básicos, principalmente relacionados con el uso de combustibles fósiles y el potencial de calentamiento global. De manera que se desarrolló un análisis integral asociado al uso de recursos naturales, como el agua, con escases que se considera un problema creciente. Si bien, las investigaciones en materiales renovables provenientes de materias primas naturales han ido en aumento, es importante enfatizar este enfoque.

Resultados

En este capítulo se consignan los resultados obtenidos del análisis de ciclo de vida (ACV) de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno, materializado a partir de la literatura existente. De este modo, se obtuvieron los datos necesarios para el desarrollo del ACV con el fin de alcanzar los objetivos propuestos en la presente investigación.

Para determinar los impactos ambientales positivos y negativos asociados al uso de fibras de fique como material de refuerzo en concreto, comparado con los mismos impactos de las fibras de PP, y así determinar ventajas y desventajas, fue necesario conocer los resultados del ACV de las fibras de fique como también el de las fibras de PP.

Los resultados del análisis permitieron cuantificar las diferentes emisiones al aire que genera cada una de las fibras durante su fase de la cuna a la puerta, así como la cuantificación del consumo de los recursos naturales.

1.23 Resultados análisis de ciclo de vida fibras de fique

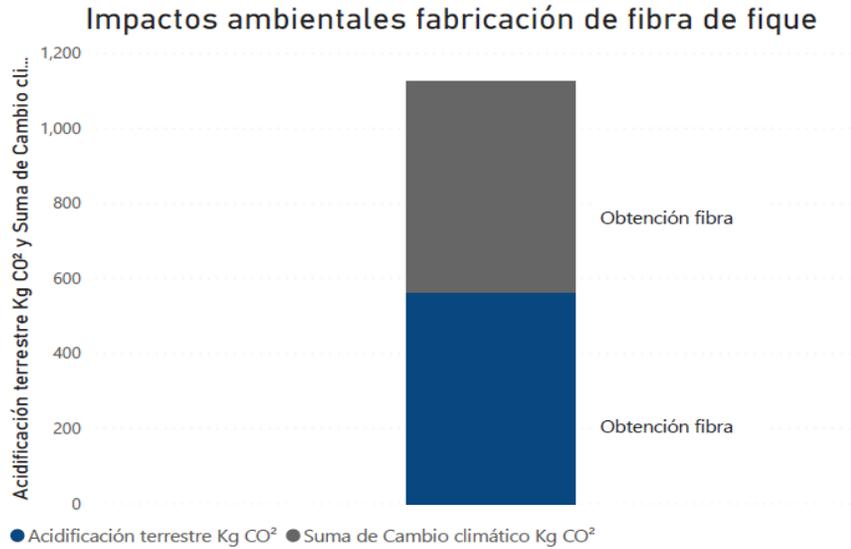
Referente a los resultados obtenidos, se observó que es posible mejorar los resultados a medida en que los datos de emisiones y aguas residuales sean tomados directamente en campo, es decir, en un cultivo local y no de la bibliografía.

Actualmente, existe literatura acerca de las aguas residuales que se generan por la producción de fibras fique. Dichas aguas residuales pueden ser utilizadas en la estabilización de suelos para la construcción, ya que contienen glucósidos que aglomeran las partículas del suelo unas con otras (Mosquera & Morales, 2008).

Si bien, el proceso de producción y obtención de las fibras de fique tan solo requieren de insumos como agua y combustible Diesel para la máquina desfibradora, debido a que gran parte del trabajo es realizado por el hombre y se utilizan herramientas menores, los

impactos que se generan son referentes a la acidificación terrestre y para el cambio climático.

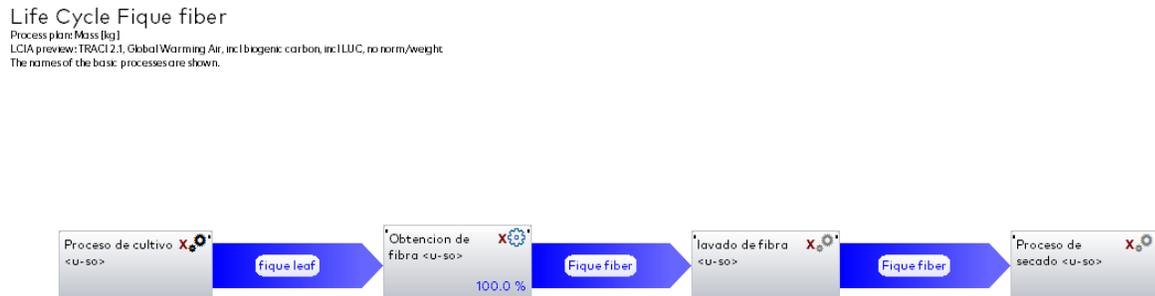
Figura 0-1. Impacto ambiental de la producción de 1000 kg de fibras de fique.



Fuente: Autor, obtenido de GaBi Software, 2020.

Como se observa en la figura 5-1, la etapa que genera el 100% de contribución al calentamiento global es la de obtención de la fibra con 570 kg eq. de CO₂, al igual que la emisión de acidificación terrestre, siendo el uso de combustible Diesel el protagonista de dichas emisiones. Estos datos fueron analizados para la producción de 1000 kg de fibra de fique.

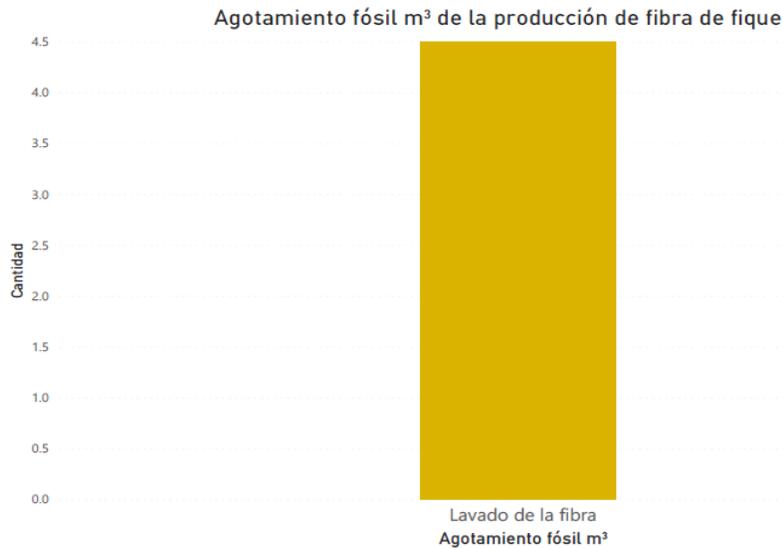
Figura 0-2. Diagrama de sankey de la fibra de fique de la cuna a la puerta. Método de análisis de impacto TRACI 2.1.



Fuente: Autor, obtenido de GaBi Software, 2020.

El impacto ambiental se generó solo en la etapa de la obtención de la fibra, por el uso de combustible de la máquina desfibadora. Actualmente, estas máquinas tradicionales funcionan con motor a combustible fósil (gasolina, Diesel). Sin embargo, existen investigadores que se encuentran desarrollando la patente de una máquina desfibadora totalmente eléctrica con el fin de garantizar la eficiencia ambiental (Expedito, 2016).

Figura 0-3. Agotamiento fósil de la producción de 1000 kg de fibra de fique.



Fuente: Autor, obtenido de GaBi Software, 2020.

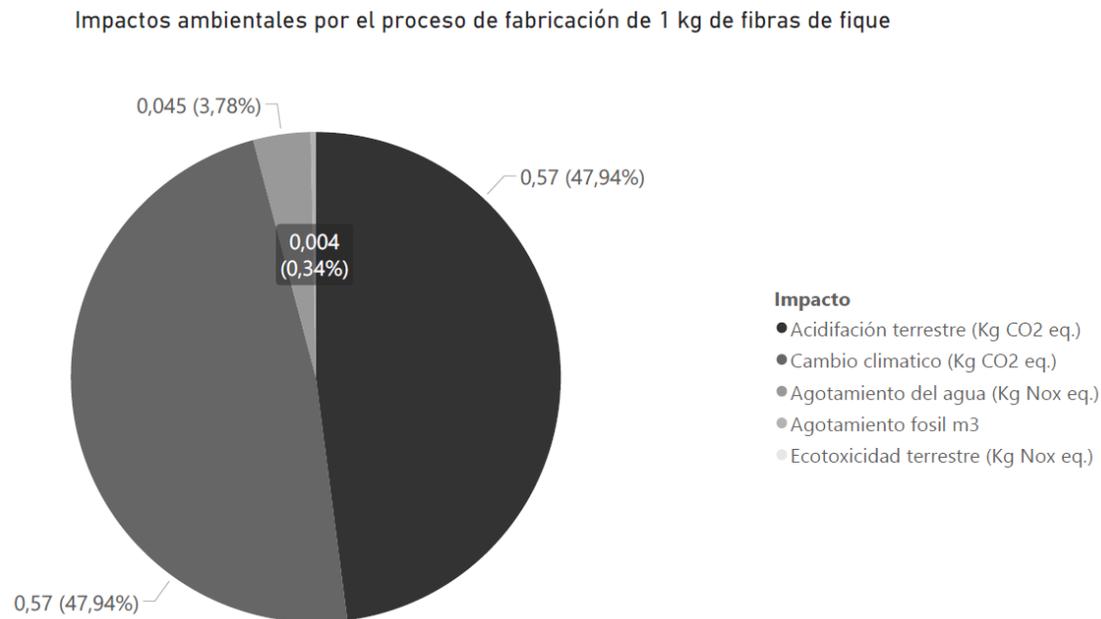
El agotamiento fósil de la producción de la fibra de fique da como resultado 4,5 m³ de agotamiento de agua en el proceso de lavado de 1000 kg de fibra. Este consumo es posible reducirlo si se optimiza el uso de agua reutilizándola o recirculándola en el proceso del segundo y tercer lavado de la fibra, con el fin de permitir el uso racional del agua (Mosquera & Morales, 2008).

Por otra parte, en el proceso de manufactura del fique se generan residuos como el jugo del fique y el bagazo que pueden ser utilizados para abonos orgánicos; producción de champiñones, orellanas y concentrados; además del compost, a partir del bagazo de fique. El jugo de fique puede ser utilizado para la elaboración de insecticidas, fungicidas y herbicidas. Es posible aprovechar los residuos que se generan de la obtención de la fibra de fique; además, el fique es un cultivo agroecológico protector de suelos y almacenador de agua (Fenalfique, 2019).

Anteriormente, el proceso de lavado de la fibra de fique se realizaba en los ríos, lo que generaba contaminación de las aguas, pero el sector ha mejorado sus prácticas y ahora el proceso de lavado es realizado en tanques plásticos de 500 y 1000 litros. El agua residual que se genera de este proceso puede ser utilizada en la estabilización de suelos para la construcción, ya que contiene glucósidos que aglomeran las partículas del suelo unas con otras (Mosquera & Morales, 2008).

A continuación, en la figura 5-4 se muestran los impactos ambientales asociados a la fabricación de 1 kg de fibras de fique.

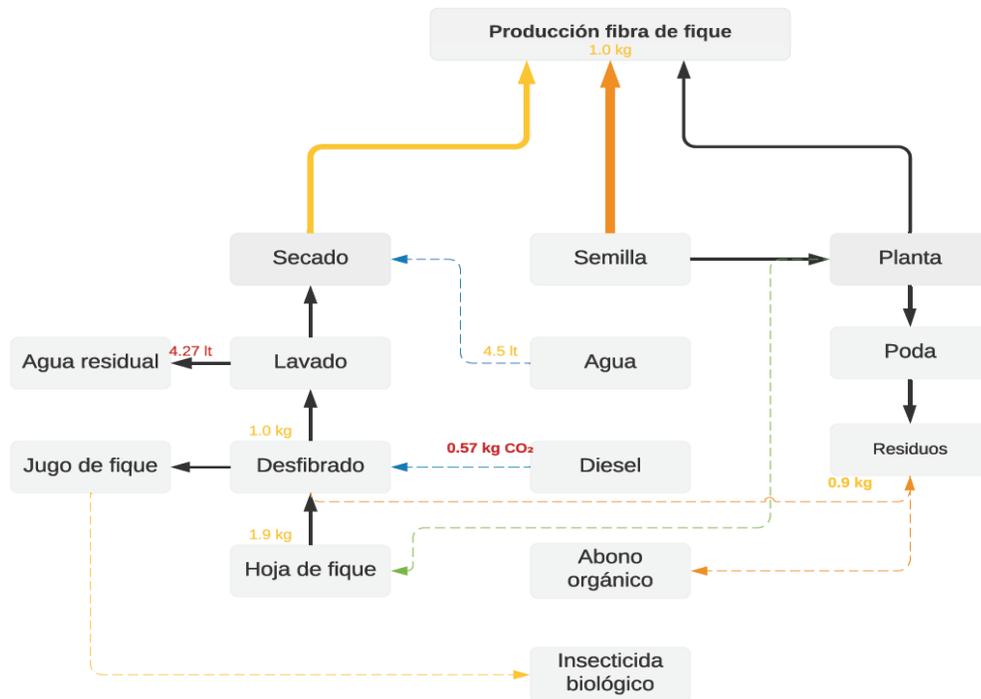
Figura 0-4. Emisiones de dióxido de carbono por proceso del sistema de producción de 1 kg de fibras de PP.



Fuente: Autor (2021)

El análisis de ciclo de vida de la cuna a la puerta da como resultado que 1 kg de fibras de fique emiten 0,57 kg eq.de CO₂; el agotamiento del agua es de 0,045 kg Nox Eq., y el agotamiento fósil es de 0,004 m³. Como se muestra en la figura 5-4, y como se mencionó anteriormente, el mayor impacto se genera en la etapa de obtención de la fibra, como consecuencia del uso de combustible Diesel de la maquina desfibadora.

Figura 0-5. Diagrama de flujo entradas y salidas del proceso de manufactura de la fibra de fique.



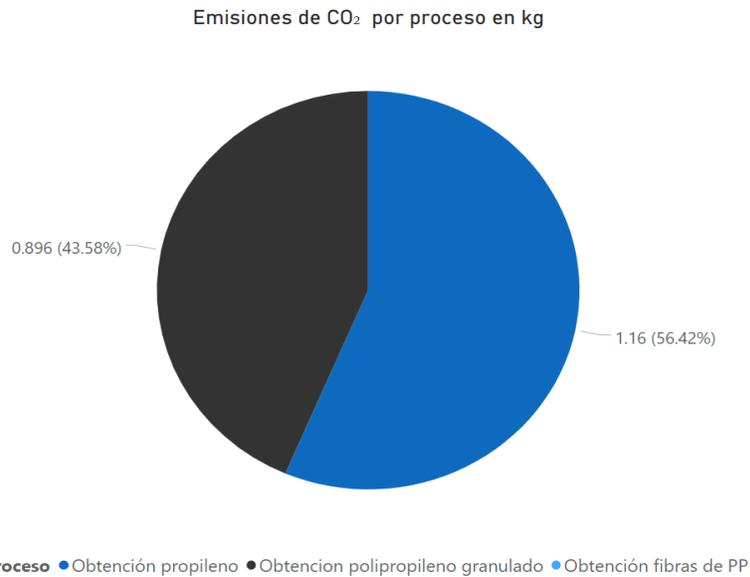
Fuente: Autor (2020).

1.24 Resultado análisis de ciclo de vida fibras de polipropileno

Con los resultados obtenidos, se concluye que el principal problema de la fabricación de las fibras de polipropileno es la obtención de la materia prima, ya que para su elaboración se requiere energía no renovable. De manera que para futuros estudios, lo ideal sería desarrollar el ACV desde el proceso de obtención del petróleo crudo, debido a que el alcance del presente estudio se inicia desde la fabricación del propileno, sin tener en cuenta la extracción del crudo y su proceso de refinería.

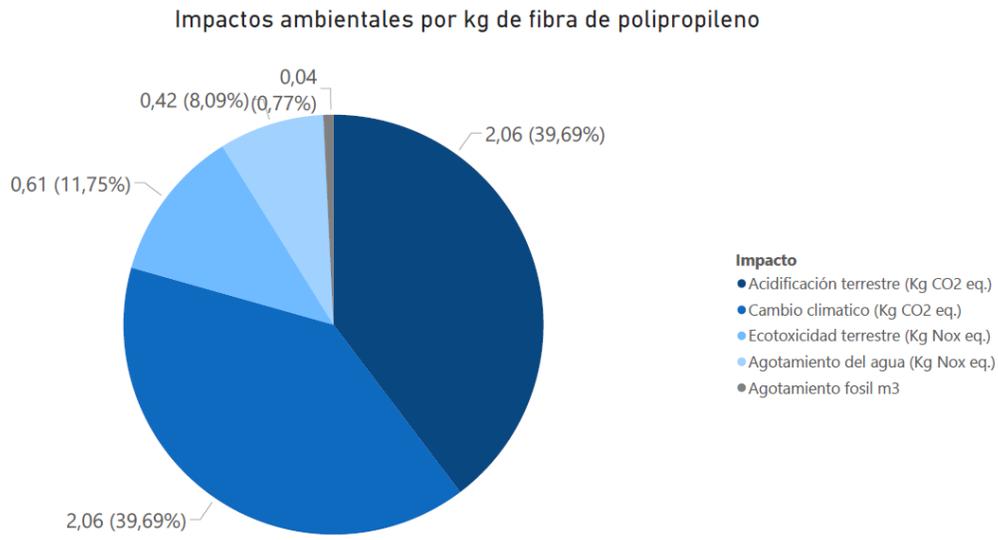
La figura 5-6 muestra las emisiones de dióxido de carbono que se generan en cada etapa del proceso de manufactura de las fibras de polipropileno, donde el proceso de obtención del propileno generó el 56.59% de CO₂ por kg, 43.5% de CO₂ por kg de fibras de PP en la fase de obtención, y, por último, 0% CO₂ por kg en la fase de producción del polipropileno granulado.

Figura 0-6. Emisiones de dióxido de carbono por proceso del sistema de producción de 1 kg de fibras de PP.



Fuente: Autor (2020).

La etapa evaluada en el ACV, desarrollado del proceso de manufactura de la fibra de polipropileno, provoca principalmente un cambio mayor en los valores de contribución relativa del impacto ambiental, asociado a la acidificación terrestre en un 39.69%, cambio climático 39.69%, ecotoxicidad terrestre 11.75%, agotamiento del agua 8.09%, y agotamiento fósil de 0.77%. Ver figura 5-7.

Figura 0-7. Impactos ambientales por kg de fibra de polipropileno.

Fuente: Autor (2021).

El proceso de manufactura de las fibras produce 2.06 kg eq. de CO₂, ecotoxicidad terrestre 0.61 kg NOx eq, agotamiento del agua 0.42 kg NOx eq, y agotamiento fósil de 0.042 m³.

Para futuras investigaciones, lo ideal sería realizar el análisis de ciclo de vida teniendo en cuenta todas las etapas del ACV como su etapa de uso y reciclaje. Las figuras 5-8 y 5-9 muestran las emisiones de CO₂, emitidas por proceso.

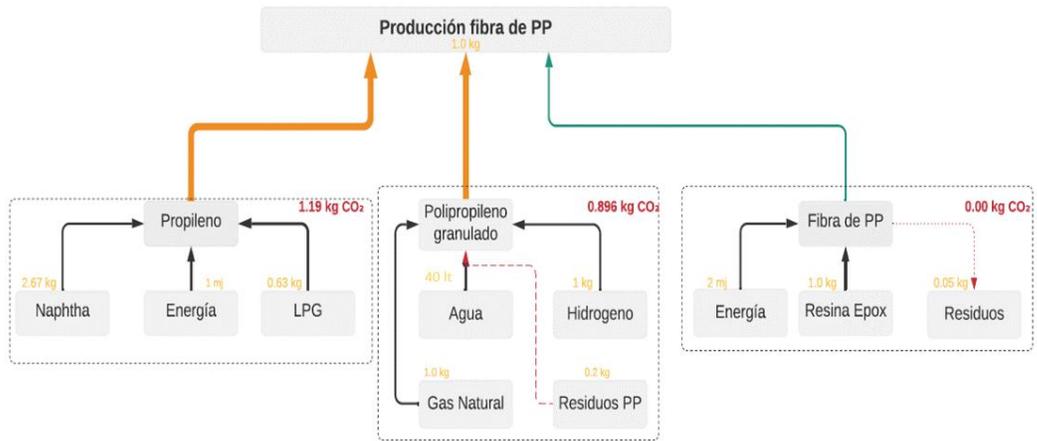
Según un informe del centro de derecho ambiental internacional (CIEL), solo en 2019, la producción e incineración de plásticos agregaría más de 850 millones de toneladas métricas de gases de efecto invernadero a la atmósfera. La mejor forma de contribuir con la reducción de las emisiones generadas por los plásticos en el medio ambiente sería reduciendo el plástico de un solo uso e implementando el reciclaje de productos hechos de materiales como el polipropileno, para ser utilizado en el desarrollo de nuevos materiales en la industria de la construcción (A.I.T, 2019).

Figura 0-8. Diagrama de sankey del proceso de manufactura de la fibra de polipropileno. Método de análisis de impacto TRACI 2.1



Fuente: Autor (2021).

Figura 0-9. Diagrama de flujo entradas y salidas del proceso de manufactura de la fibra de polipropileno.



Fuente: Autor (2021).

Si bien, la mayor emisión de CO₂ se genera en la fase de producción del propileno, generando 1.19 kg eq. de CO₂ por kg, las emisiones de CO₂ se generan en un 56.5% de la huella de carbono del sistema de producción de las fibras de polipropileno. El proceso de obtención del polipropileno granulado genera 0.896 kg eq. de CO₂, y el proceso de obtención de la fibra como tal genera 0.00 kg eq. de CO₂.

Ciertamente, esto abre una puerta al uso de polipropileno reciclado para la obtención de fibras de PP, ya que posiblemente las emisiones de dióxido de carbono que se generen al medio ambiente sean reducidas a la mitad. Para fabricar un kilogramo de plástico de cero se emite unos 3.5 kg eq. de CO₂ a la atmosfera, mientras que por cada kilo de plástico que

se fabrique con materia reciclada emitimos 1.7 kg eq. de CO₂. Al evitar la primera fase del proceso de producción, la que se realiza en la refinería, se reduce la huella de carbono un 49% (ZEO, 2020).

Discusión

Hernández y otros (2014), plantea que las discusiones involucran señalar qué lecciones se aprendieron con el estudio y si los hallazgos confirman o no el conocimiento previo, además de proponer acciones. En la interpretación de los resultados y la discusión, se revisaron los hallazgos más importantes y las reflexiones respecto al significado de los resultados del ACV y del estudio en general; además de evidenciar las limitaciones del estudio y hacer sugerencias para futuras investigaciones.

Como se mencionó anteriormente, no se tiene un comparativo técnico y ambiental del uso de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno en concreto, lo cual no permite confrontar los resultados obtenidos. Sin embargo, en el presente estudio se desarrolló el comparativo técnico de las propiedades mecánicas del concreto fibroreforzado con dichas fibras.

De acuerdo con los datos obtenidos en la revisión de literatura, ya que se tiene información valiosa hasta el momento, se pudo evidenciar que, los concretos de 4000 psi adicionados con fibras de fique pueden obtener una resistencia a la compresión hasta de 50.87 Mpa, y una resistencia a flexión de 4.15 Mpa, con una adición de 1.5% de fibras (Bohórquez, 2011). Uno de los investigadores concluye que, pese a que la resistencia a compresión disminuye comparada con la muestra control, no se descarta su aplicación debido a los aportes que generan las fibras de fique en la resistencia a flexión.

Aunque no es el objeto del estudio, cabe resaltar que existe un estudio con la fibra de sisal y la fibra de cáñamo comparada con la fibra de PP, el cual concluye que, pese a que la resistencia a compresión del concreto adicionado con fibras de sisal no supera la resistencia a compresión del concreto con fibras de PP, este cumple con la resistencia de diseño (Castoldi et al., 2019).

Por otra parte, una investigación desarrollada por Amaya & Ramírez (2019), en concreto adicionado con fibras de cáñamo vs. fibras de polipropileno, identificó que la resistencia a compresión es superada en un 2% por el concreto adicionado con fibras de cáñamo.

De manera que los resultados que se tienen hasta el momento han sido positivos, lo cual abre una puerta para continuar con el desarrollo de investigaciones en el campo de las fibras naturales, lo que permite inferir que el presente estudio incitará a otros investigadores a continuar con los estudios en dichas fibras, tales como las fibras de cáñamo, sisal y fibras de fique.

La presente investigación fue desarrollada con el fin de contribuir con una base teórica sobre los impactos ambientales que genera la implementación de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno, ya que como se mostró en la figura 2.2 de la revisión de literatura en investigaciones de dichas fibras, se evidenció que el desarrollo de investigaciones en fibras naturales ha ido en aumento, pese a que aún no se conoce si las fibras naturales como las fibras de fique son amigables ambientalmente.

1.25 Viabilidad ambiental de las fibras de fique

Los materiales desarrollados con materia prima renovable como las fibras naturales se consideran “materiales respetuosos” con el medio ambiente, lo que está relacionado con el uso reducido de combustibles fósiles y la emisión de dióxido de carbono en comparación con las fibras poliméricas a base de petróleo (Korol et al., 2020).

Para dar respuesta al objetivo principal de la investigación, se desarrolló un análisis de ciclo de vida de las fibras, teniendo en cuenta no solo las emisiones al aire sino también, el agotamiento de los recursos naturales.

En la actualidad, no se tienen otras investigaciones acerca de los impactos ambientales de la fibra de fique, de modo que, no es posible confrontar los resultados obtenidos del presente estudio con otras investigaciones.

Sin embargo, el ACV desarrollado, arrojó como resultado que las fibras de fique emiten 0.57 kg eq. de CO₂ por kg de fibra en su etapa de la cuna a la puerta, y consumen 4.5

litros de agua por kg, determinando que una de las ventajas que tiene dicha fibra es que no necesita de riego para su proceso de cultivo.

Ciertamente, para futuras investigaciones sería importante no sólo hacer la comparación con fibras poliméricas, sino también con otras fibras naturales, con el fin de identificar cuál de estas consume menos recursos hídricos y genera una menor emisión de dióxido de carbono.

1.26 Viabilidad ambiental de las fibras de polipropileno

Un estudio realizado por Korol, Hejna, Burchart y Wachowicz (2020), determinó que la producción de fibras de polipropileno, de la cuna a la tumba, emite 3.43 kg eq. de CO₂, siendo el mayor impacto en la huella de carbono del PP, la emisión de dióxido de carbono durante la producción de propileno en el proceso de polimerización de monómeros, el cual genera emisiones indirectas de CO₂, relacionadas con la producción de electricidad, utilizada en el sistema de producción de polipropileno. Cabe resaltar que, las emisiones de CO₂, generaron más del 90% de la huella de carbono del sistema de producción de polipropileno.

En la presente investigación se determinó que la producción de fibras de PP de la cuna a la puerta generan 2.06 kg eq. de CO₂ donde el 56.5% de la huella de carbono se genera en la fabricación del propileno, y el 43.5% en la producción del polipropileno granulado.

En cuanto al consumo de recursos hídricos, las fibras de polipropileno consumen 59 litros de agua en su proceso de producción, según Korol, Hejna, Burchart y Wachowicz (2020). Sin embargo, en la presente investigación se identificó un consumo de 42 litros de agua por kg de fibras de PP.

Tabla 0.1 Emisión de dióxido de carbono y agotamiento de agua por kg de fibra de polipropileno.

Emisión CO ₂	Agotamiento del agua	Fuente
3.43 kg CO ₂ /kg	59 litros	Korol, Hejna, Burchart y Wachowicz, (2020)
2.17 kg CO ₂ /kg	-	Sociedad Australiana de ACV (2020)
2.06 kg CO ₂ /kg	42 litros	Autor

Fuente: Autor (2021).

Cabe aclarar que el estudio desarrollado por Korol, Hejna, Burchart y Wachowicz (2020), es un ACV desarrollado de “la cuna a la tumba”. Por ello, la diferencia en el valor de emisiones de CO₂.

En cuanto al valor del agotamiento de agua, se tomaron los datos de la investigación desarrollada por Mannheim & Simenfalvi (2020) y Korol, Hejna, Burchart y Wachowicz, (2020), se obtuvo el promedio de los datos, y se tomó dicho valor para el desarrollo del ACV.

1.27 Viabilidad ambiental de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno

Una de las ventajas que se tiene con el uso de fibras de fique es que estas provienen de una planta que no requiere recursos como el agua para su cultivo, el agua es utilizada para el lavado de la fibra durante su proceso de manufactura y, sin embargo, como se mostró en la figura 5-3, el consumo de agua para lavar 1000 kg de fibra de fique es de 4,5 m³; es decir, 0.0045 m³ por kg de fibra.

De otro lado, en cuanto a las fibras de polipropileno, la Sociedad Australiana de Análisis de Ciclo de Vida, reporto 2,17 kg eq. de CO₂, referencia no tan lejana de los datos obtenidos en el presente estudio, el cual dio como resultado 2.06 kg eq. de CO₂, desde el proceso de obtención del propileno, materia prima del PP granulado que se requiere para la obtención de las fibras de polipropileno.

De manera que, el resultado del estudio del ciclo de vida de las dos fibras mostró que las fibras de polipropileno generan un mayor impacto en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono, ya que estas generan 2,06 kg eq. de CO₂ mientras que las fibras de fique producen 0.57 kg eq. de CO₂; es decir, 73% menos CO₂ que las fibras de PP.

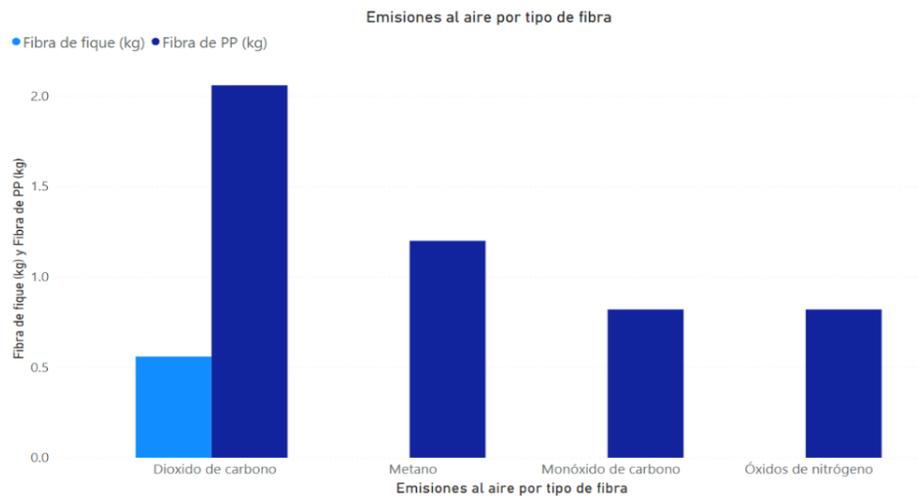
Tabla 0.2 Emisiones al aire por tipo de fibra.

Emisiones al aire por tipo de fibra		Fibra de PP (kg)	Fibra de fique (kg)
Monóxido de carbono	CO	0.82	0.00
Óxidos de nitrógeno	Nox	0.82	0.00
Dióxido de carbono	CO ₂	2.06	0.57
Metano	CH ₄	1.2	0.00

Fuente: Autor (2021).

En la etapa de la cuna a la puerta, no es posible evaluar las emisiones de metano que posiblemente pueda generar las fibras de fique. Por ello, es importante evaluar el ACV completo de las fibras, con el fin de poder identificar dicho factor.

Figura 0-1. Emisiones al aire por kg de fibras de fique y fibras de polipropileno.

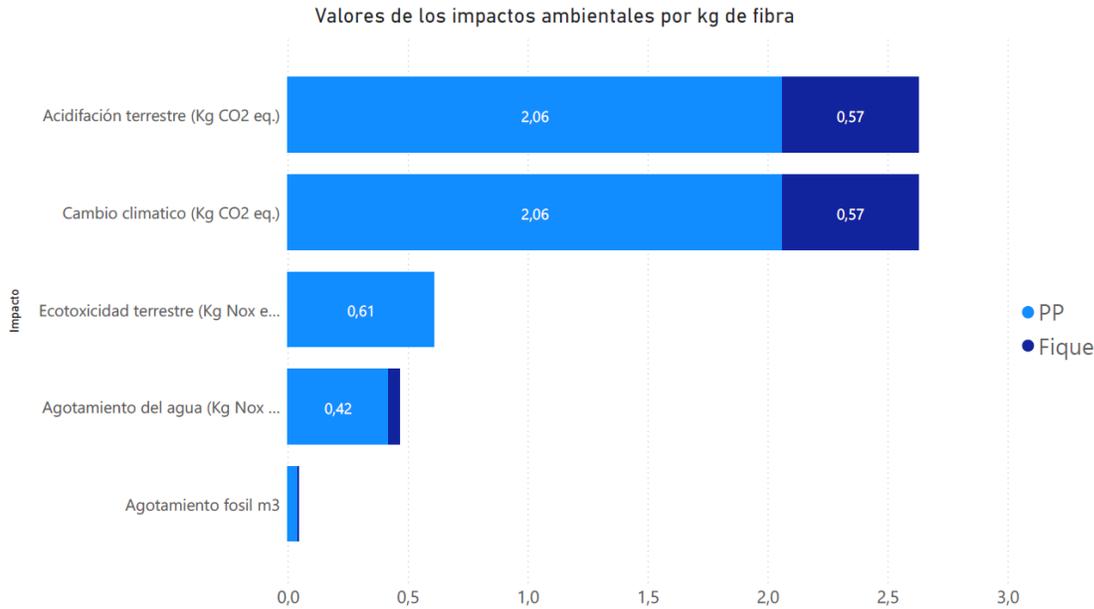


Fuente: Autor (2021).

La figura 6-1 muestra los impactos ambientales asociados al proceso de manufactura de las fibras de fique y las fibras de polipropileno, donde se muestra que las fibras de fique producen 0.57 kg eq. de CO₂, mientras que las fibras de polipropileno generan 2.06 kg eq.

de CO₂; el proceso de fabricación de las fibras de PP genera 1.2 kg de metano, 0.82 kg eq. de óxido de nitrógeno y 0.82 kg eq. de monóxido de carbono.

Figura 0-2. Valores de los impactos ambientales por kg de fibra



Fuente: Autor (2021).

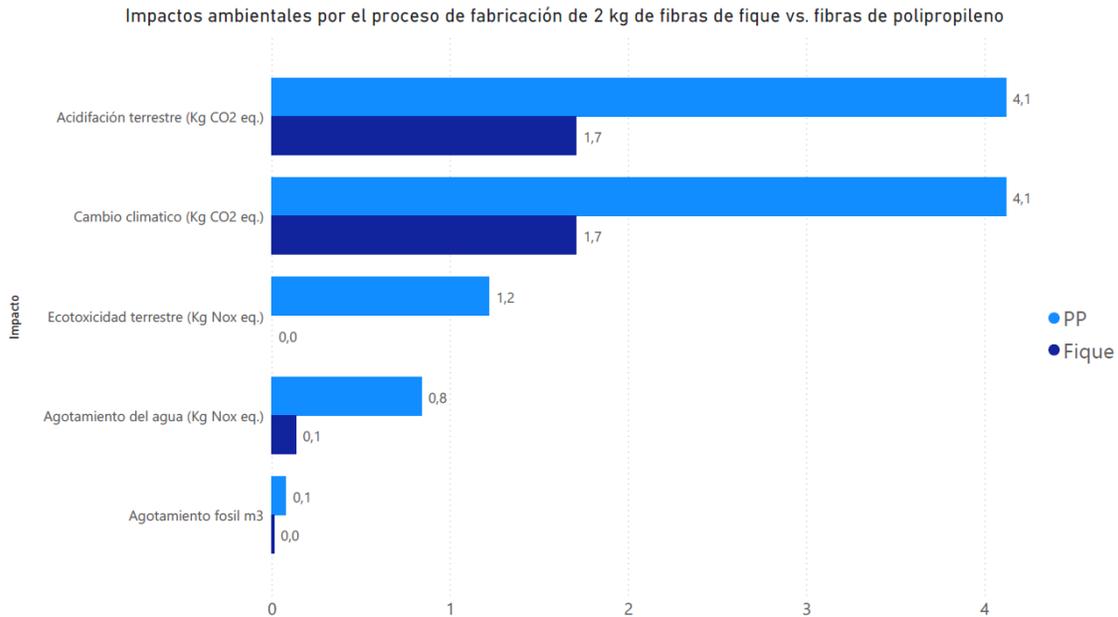
Como se muestra en la figura 6-2, las fibras de fique generan un menor impacto ambiental, ya que estas solo emiten dióxido de carbono en el proceso de desfibrado. Debido al uso de combustible Diesel, el agotamiento del agua es de 0,04 kg Nox Eq. por kg, a causa de su proceso de lavado; el agotamiento fósil es de 0,004 m³, mientras que el agotamiento del agua de las fibras de PP es de 0.42 kg Nox Eq., y emiten 73% más de dióxido de carbono, generando además emisiones de ecotoxicidad terrestre.

1.27.1 Viabilidad ambiental de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno adicionadas en un concreto de 3000 psi.

Como se mencionó anteriormente, no se tiene establecida la dosificación óptima de las fibras de fique, sin embargo, Pinzón (2013) determinó que para un concreto de 3000 psi se requieren 3.3 kg/m³ de fibras de fique. Dicho esto, se cuantificaron los impactos ambientales de un concreto adicionado con dichas fibras vs. un concreto adicionado con 2

kg/m³ de fibras de polipropileno, dosificación genérica establecida para un concreto de 3000 psi (Sika, 2012).

Figura 0-3. Impactos ambientales asociados al proceso de fabricación de 3.3 kg de fibras de fique vs. 2 kg de fibras de polipropileno.



Fuente: Autor (2021)

La figura 6-3 muestra que los impactos asociados a 3,3 kg de fibras de fique, aun así, son menores comparados con los impactos que se generan por la fabricación de 2 kg de fibras de polipropileno, puesto que la emisión de dióxido de carbono generada por la fabricación de las fibras de PP es de 4,12 kg eq. de CO₂, 59% por encima de las emisiones producidas por las fibras de fique. Así mismo, el agotamiento del agua es de 0,8 kg Nox eq., mientras que el de la fibra de PP es de 0,13 kg Nox eq., el agotamiento fósil es de 0,1 m³, y el de las fibras de fique es de 0,012 m³.

1.28 Viabilidad técnica de las fibras de fique vs. fibras de polipropileno

Actualmente, no se tienen investigaciones que comparen técnicamente la resistencia del concreto adicionado con fibras de polipropileno vs. fibras de fique. Sin embargo, con la información que se tiene, se pudo evidenciar que los concretos de 4000 psi adicionados

con fibra de fique pueden obtener una resistencia a la compresión hasta de 50.87 MPa, y una resistencia a la flexión de 4.15 MPa, con una adición de 1.5% de fibra, según un estudio realizado por Bohórquez, 2011. La adición de estas fibras contribuye de buena manera a la resistencia a la flexión de los concretos. En las adiciones entre el 0.5% y 1.5%, se encuentra una alternativa de materiales alternativos para ser tenidos en cuenta como una oportunidad para el reforzamiento del concreto (Bohórquez, 2011).

En efecto, la resistencia a compresión disminuye en los concretos adicionados con 1.5% de fibras, ya que al querer obtener mayor resistencia a flexión se debe sacrificar resistencia a la compresión. Aun así, esta pérdida de resistencia se ve acompañada de una mejor unión en la matriz de concreto en donde las fibras transmiten una mejor distribución de las cargas axiales conduciéndolas a una mejor distribución y haciendo que el conjunto se mantenga unido (Bohórquez, 2011).

Aunque la fibra de fique afecte la resistencia a compresión, la investigación desarrollada por Bohórquez (2011) ha considerado que la adición de dichas fibras supera la resistencia a flexión comparada con la muestra control. Así mismo, disminuye la fisuración del concreto en estado fresco.

Por otra parte, Barbosa & Mayorga (2015) identificaron que la resistencia a flexión del concreto con fibras de fique llega a un 99%, comparada con el concreto sin adición. Esto lo hace interesante como un material alternativo de fácil alcance, para lo cual es necesario el desarrollo de mayores investigaciones que permitan establecer el porcentaje correcto de adición de fibras, y así no se vea afectada la resistencia a compresión, ya que con las 6 investigaciones que se tienen no es posible estandarizar el porcentaje de adición de estas. A su vez, es necesario evaluar otros aspectos como su longitud y tratamientos que permitan aumentar la durabilidad de las fibras.

Ahora bien, con la finalidad de evaluar la viabilidad técnica del uso de fibras de fique vs. fibras de polipropileno, se tomaron los datos obtenidos por los investigadores en dichas fibras, donde se pudo identificar que la resistencia a compresión del concreto con fibras de fique presenta mayor ventaja comparada con el concreto adicionado con fibras de PP, dado que fue superada en un 55% en una de las investigaciones desarrollada por Bohórquez (2011), para un concreto de 4000 PSI.

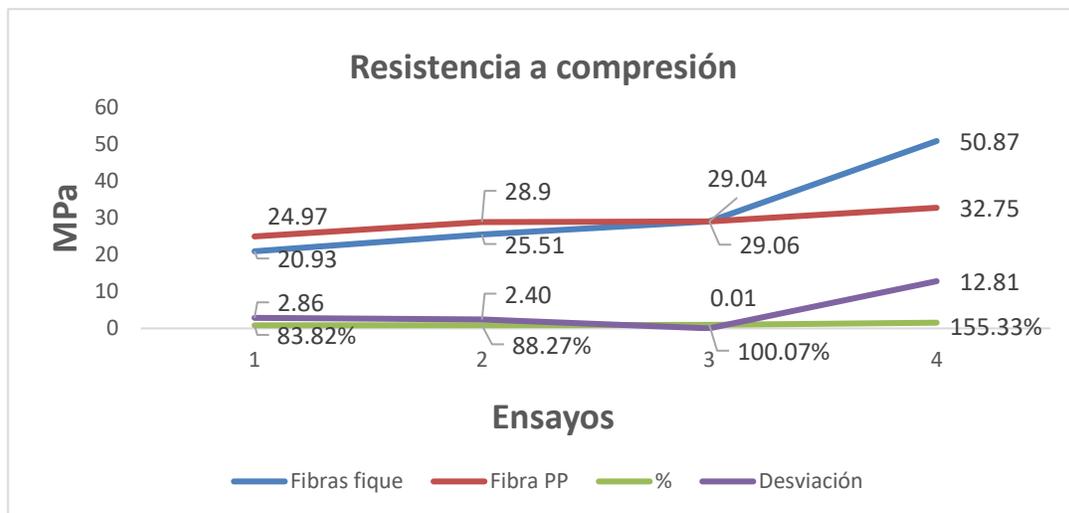
Tabla 0.3 Resistencia a compresión del concreto con adición de fibras de fique vs. fibras de polipropileno.

Resistencia a compresión MPA						
Ensayo	Autor	Fibras fique	Autor	Fibra PP	%	Desviación
1	Barbosa, Mayorga, 2015	20,93	Vega, 2019	24,97	83,82%	2,86
2	Pinto & Figueroa, 2016	25,51	Sika, 2012	28,9	88,27%	2,40
3	Pinzón, 2013	29,06	Govindasami, Sakthivel & Harish, (2018)	29,04	100,07%	0,01
4	Bohórquez, 2011	50,87	Mendoza, Aire & Dávila, 2011	32,75	155,33%	12,81

Fuente: Autor (2021).

De otro lado, se tienen dos estudios que comprueban que las fibras de PP superan la resistencia a compresión en un 18%, comparada con la resistencia obtenida por concretos adicionados con fibras de fique. Dichos resultados muestran que es posible considerar que las fibras de fique pueden aportar a la resistencia a compresión, siempre y cuando se continúen con estudios que permitan establecer la dosificación de las fibras, e investigaciones que realicen ensayos técnicos en los que se pueda comparar la resistencia de un concreto adicionado con fibras de fique vs. fibras de polipropileno.

Figura 0-4. Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique vs. fibras de polipropileno.



Fuente: Autor (2021).

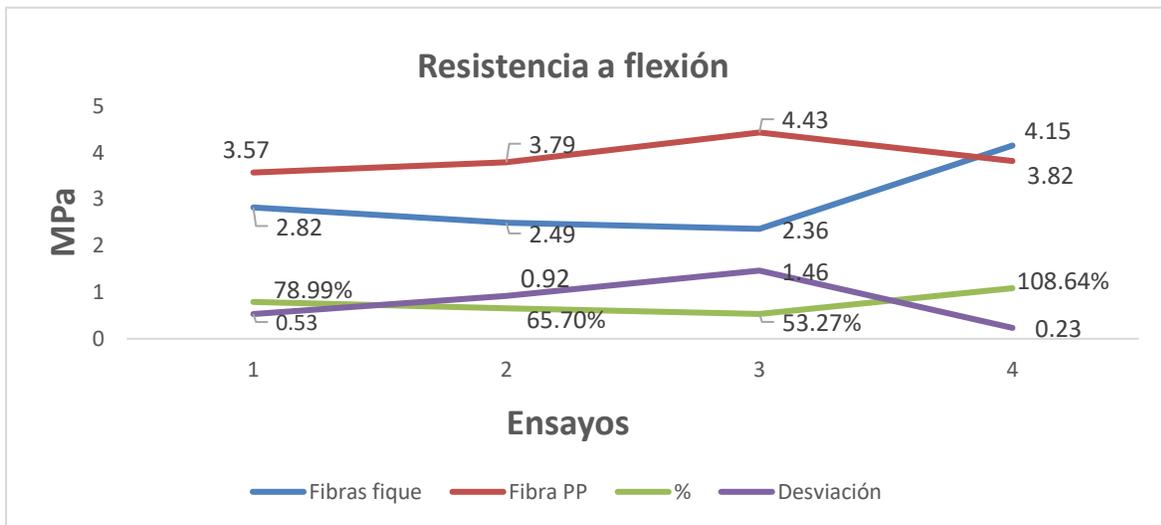
Por otra parte, respecto a la resistencia a flexión del concreto, se pudo identificar que, las fibras de polipropileno en tres de las cuatro muestras, superó dicha resistencia comparada con los resultados del concreto adicionado con fibras de fique, diferencia que oscila entre el 47% y 21%. Sin embargo, un estudio desarrollado por Bohórquez (2011) estableció que la resistencia a flexión de un concreto de 4000 psi, adicionado con fibras de fique, supera la resistencia obtenida con un concreto adicionado con fibras de PP en un 8%. Ver tabla 6.4.

Tabla 0.4 Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique vs. fibras de polipropileno.

Resistencia a flexión MPA						
Ensayo	Autor	Fibras fique	Autor	Fibra PP	%	Desviación
1	Barbosa, Mayorga, 2015	2,82	Vega (2019)	3,57	78,99%	0,53
2	Pinto & Figueroa, 2016	2,49	Sika (2012)	3,79	65,70%	0,92
3	Pinzón, 2013	2,36	Govindasami, Sakthivel & Harish (2018)	4,43	53,27%	1,46
4	Bohórquez, 2011	4,15	Mendoza, Aire & Dávila (2011)	3,82	108,64%	0,23

Fuente: Autor (2021).

Figura 0-5. Resistencia a flexión del concreto con adición de fibras de fique vs. fibras de polipropileno.



Fuente: Autor (2021).

Pese a que tres de las cuatro muestras superan la resistencia a flexión del concreto adicionado con fibras de fique, uno de los investigadores determinó que dichas fibras sí aportan a la resistencia a flexión; esto, comparado con la resistencia obtenida con un concreto adicionado con fibras de PP. De manera que con un solo resultado a favor no es posible determinar su viabilidad en cuanto a esto, ya que para poder establecerla es importante continuar con el desarrollo de investigaciones en dichas fibras en las que se evidencien potencialidades que puedan aportar beneficios al concreto, y de esta forma, contribuir con el desarrollo de materiales sostenibles.

Conclusiones

El desarrollo de la tesis se cierra en dar respuesta a las preguntas de investigación y dando cumplimiento a los objetivos del estudio. Con base en el análisis comparativo técnico y ambiental del uso de fibras de fique vs. fibras de polipropileno se pudo concluir que:

Dando respuesta la pregunta de investigación,

¿Cuál es la viabilidad ambiental y técnica del uso de fibras de fique vs. fibras de polipropileno aplicadas en el reforzamiento del concreto de alta resistencia?, se tiene que:

- No se descarta el uso de fibras de fique para el reforzamiento del concreto, pues estas no afectan la resistencia a flexión y la afectación a la resistencia a compresión del concreto no es significativa comparada con el concreto simple. Al contrario de las fibras de PP, las cuales, como se mencionó en el documento, se encuentran estandarizadas y actúan como refuerzo secundario en el concreto, reduciendo el agrietamiento por contracción plástica en estado fresco y por temperatura en estado endurecido, sin afectar la resistencia del concreto.
- Aunque no es el objeto del estudio, es importante destacar que con el análisis de la literatura existente, se identificó que las fibras naturales más utilizadas como las fibras de sisal, yute, fique y cáñamo adicionadas al concreto, superan la resistencia a flexión en un promedio de 2% y 4%, comparadas con la resistencia del concreto simple, además de los beneficios que estas aportan en cuanto al control de agrietamiento por retracción plástica del concreto.
- Por otra parte, las fibras de fique provienen de un cultivo ecológico protector de suelos y almacenador de agua, el cual requiere el mínimo de recursos y consumo de energía en su proceso de siembra y obtención, lo que la hace un material alternativo amigable con el medio ambiente.

- Con el ACV de la “cuna a la puerta” realizado a las fibras de fique se identificó que el proceso de manufactura de 1 kg de fibra genera **0,57 kg eq. de CO₂**, a causa del uso de combustible Diesel, mientras que el ACV de la fibra de polipropileno genera **2,06 kg eq. de CO₂** por la obtención de 1 kg de fibra. Es decir, 1.5 kg más de dióxido de carbono por cada kg de fibra. Teniendo en cuenta esto, el impacto ambiental que se genera por el uso de fibras de fique en un concreto de 21 MPa sería de **1,88 kg eq. de CO₂**, mientras que el impacto ambiental que se genera por el uso de fibras de PP en un concreto de 21 MPa, sería de **4.12 kg eq. de CO₂**. Lo que indica que para un concreto fibroreforzado de 21 MPa, las fibra de PP generan **2.23 kg eq. de CO₂** de más.
- Por otra parte, Fenalfique considera que es posible aprovechar los residuos obtenidos de la producción de la fibra de fique como el jugo y el bagazo; el jugo para la elaboración de insecticidas, fungicidas y herbicidas, y el bagazo para abono orgánico. De este modo, sería importante evaluar los impactos económicos y sociales que generaría el aprovechamiento de dichos residuos, en tal caso que se puedan implementar a futuro las fibras de fique y surja la necesidad de producirlas en grandes cantidades.
- Ciertamente, el mayor impacto de las fibras de polipropileno se genera en la etapa de obtención del PP granulado, el cual se genera en su proceso de polimerización.
- Cabe destacar que, la investigación permitió identificar que la adición de fibras de fique afecta la resistencia a la compresión, sin embargo, no se descarta su uso para la construcción de elementos en concreto como losas, vigas y dinteles de media longitud, además de ser un material alternativo estas aportan a la resistencia a la flexión del concreto.

Es decir, que dichas conclusiones permiten dar cumplimiento al objetivo de investigación en determinar la viabilidad técnica y ambiental de las fibras de fique comparada con las fibras de PP.

De otro lado, dando respuesta a la pregunta de investigación ¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de fique como material potencial para el reforzamiento del concreto?, se tiene que:

Tabla 0.1 Propiedades de las fibras de fique vs. fibras de polipropileno.

Fibra	Modulo elasticidad (GPa)	Resistencia tracción (Mpa)	Fuente
Fibras de PP	4	450	(Montardo 2005), (Amaya & Ramírez 2019)
Fibras de fique	4.45	412	(Pinzón, 2013), (Pinto & Figueroa, 2016)

Fuente: Autor (2021).

La tabla 7.1 permite identificar que las fibras de fique presentan una resistencia a tracción de 412 MPa, lo que indica que está en un 8.5% por debajo en resistencia a tracción de las fibras de PP, en cuanto al módulo de elasticidad. Las fibras de PP tienen un 9% menos que las fibras de fique.

- El aporte a la resistencia a compresión del concreto con fibras de polipropileno es similar a la resistencia del concreto adicionado con fibras de fique. En cuanto a la resistencia a flexión del concreto adicionado con fibras de PP, se identificaron resistencias mayores, pese a ello, son interesantes los resultados obtenidos hasta el momento de los concretos adicionados con fibras de fique.

Sin embargo, es necesario continuar con el desarrollo de investigaciones acerca de la resistencia a compresión y flexión del concreto fibroreforzado, para poder establecer las resistencias máximas permitidas del concreto adicionado con fibras de fique, ya que con los resultados obtenidos hasta ahora, no es posible identificar ventajas técnicas en cuanto a la resistencia a flexión que aportan dichas fibras al concreto, comparada con la misma resistencia que aportan las fibras de PP.

Ahora bien, con el ACV desarrollado de la cuna a la puerta de las fibras de PP, se pudo dar cumplimiento al objetivo que hace referencia en determinar el impacto ambiental en la fase de la cuna a la puerta de las fibras de fique y fibras de polipropileno, por lo cual se concluyó lo siguiente:

- Como se evidencio en la figura 5-2 diagrama del ACV de las fibras de fique desarrollado de la cuna a la puerta, se muestra que el impacto ambiental negativo que se genera se encuentra en el proceso de obtención de dichas fibras, debido al consumo de agua produciendo el agotamiento fósil en un **4,5 m³** por 1000 kg de dicha fibra. Dicha etapa genera el 100% de contribución al calentamiento global con **0.57 kg eq. de CO₂** por 1 kg de fibras de fique, al igual que la emisión de acidificación terrestre, siendo el uso de combustible Diesel el protagonista de dichas emisiones.
- Cabe resaltar que, como impacto positivo, se tiene que el agua residual derivada del proceso de obtención de la fibra puede ser utilizada en la estabilización de suelos para la construcción, debido a que esta contiene glucósidos que aglomeran las partículas del suelo unas con otras (Mosquera & Morales, 2008). También, es posible utilizar los residuos que se generan de la obtención de la fibra de fique, ya que es posible utilizar el jugo del fique y el bagazo como insecticidas, abonos orgánicos, además del compost, a partir del bagazo (Fenalfique, 2019).
- El ACV desarrollado de la cuna a la puerta de las fibras de PP mostrado en la figura 5-7, permitió identificar que la mayor emisión de CO₂ se genera en la etapa de creación del propileno, el cual es del 56.5% de la huella de carbono generando **1.19 kg eq. de CO₂**. El proceso de obtención del polipropileno granulado generó el 43.5% de emisiones de CO₂, lo que equivale a un **0.896 kg eq. de CO₂**. Por último, en la etapa de obtención de fibras de PP, no se generaron emisiones de dióxido de carbono, lo que indica que el proceso de manufactura de 1 kg de fibras de polipropileno produce **2.06 kg eq. de CO₂**.
- De otro lado, como impactos negativos ambientalmente también se tiene 0.61 kg NOx eq. de ecotoxicidad terrestre, 0.42 kg NOx eq. de agotamiento del agua, y agotamiento fósil de **0.12 m³**. Si bien, el polipropileno es un material que dura hasta 15 años antes de que sea necesario su reemplazo, la mejor forma de contribuir positivamente con el medio ambiente sería, reduciendo su uso o reutilizando los plásticos de PP en el desarrollo de materiales alternativos para la industria de la construcción.

Es decir, que también se dio respuesta a la pregunta de investigación ¿Cuáles son los impactos ambientales positivos y negativos que generan las fibras de polipropileno en la etapa de la cuna a la puerta?

Por último, es importante aclarar que, el meta-análisis desarrollado en el presente estudio, no fue publicado debido a que los resultados obtenidos por los diferentes autores, al analizarlos en el software RevMan no presentaron desviaciones significativas. Sin embargo, se adicionó el gráfico de Forest plot en los anexos. Ver tabla 10.

1.29 Ventajas y desventajas de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno

Dando cumplimiento al objetivo de investigación, en identificar ventajas o desventajas técnicas de las fibras de fique como material de refuerzo en concreto, con la presente investigación se evidenció que tanto las fibras de polipropileno como las fibras de fique, aportan beneficios a la resistencia a flexión y la resistencia al agrietamiento del concreto.

Por otra parte, se identificó que ambientalmente las fibras de fique son suficientemente competentes comparadas con los mismos impactos asociados a la producción de las fibras de PP, en cuanto a los beneficios ambientales y menores impactos negativos que generan.

No obstante, esto permite abrir una ventana en el campo de la construcción con el fin de implementar materiales alternativos, y así aprovechar las ventajas y beneficios que estas aportan al medio ambiente, si estas fueran implementadas en el reforzamiento del concreto. De manera que se estableció un cuadro comparativo que muestra las ventajas y desventajas que tiene una frente a la otra, con el fin de que otros investigadores continúen con el desarrollo de estudios en fibras naturales como las fibras de fique.

Ver tabla 7.2 donde se muestra el cuadro comparativo con las ventajas y desventajas ambientales que tienen cada una.

Tabla 0.2 Cuadro comparativo ventajas y desventajas técnicas y ambientales de las fibras de fique vs. fibras de PP.

TÉCNICAS		
FIBRA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
FIQUE	Buen contacto interfacial debido a su superficie rugosa	Baja resistencia en ambientes alcalinos
	Menos abrasiva durante su proceso de fabricación	Solo se usa el 4% de la planta
	Cuando se queman los compuestos con fibras naturales como el fique, se reduce el impacto de CO2 y otros gases tóxicos	Menor resistencia a la flexión en comparación con el concreto adicionado con fibras de PP
	Disminuye la fisuración del concreto	Puede degradarse parcialmente cuando se expone a fuertes ácidos.
	Mejor elasticidad	
	Absorben bien las vibraciones y por lo tanto el sonido	
	Mejora la resistencia a compresión del concreto	
POLIPROPILENO	Es el material plástico de menor peso específico	hidrófobas y por lo tanto tienen pobres características de adherencia con la matriz de cemento
	Ausencia de corrosión	Bajo punto de fusión
	Disminuye la fisuración del concreto	Alta combustibilidad
	Mejora la resistencia a compresión y flexión del concreto	Módulo de elasticidad relativamente bajo
	Evita el traspaso de humedad	
	Excelente resistencia química a solventes comunes	
	Prolonga la vida útil en hormigones y morteros	
	Resistencia a las sales y ácidos	
Resistencia a la abrasión		
AMBIENTALES		
FIQUE	Menor emisión de dióxido de carbono	Mano de obra no capacitada, lo que genera desechos del 96% de la planta que se usa como el bagazo y el jugo, los cuales poseen potencial para el desarrollo de nuevos productos
	Son renovables y se necesita menor cantidad de energía de entrada por unidad de producción	
	Biodegradables	
	Mínimo uso de recursos y energía para su proceso de fabricación	
	Proviene de un cultivo protector de suelos y almacenador de agua	
	El agua residual obtenida del proceso de obtención de la fibra puede ser utilizada en la estabilización de suelos	
No requiere de fertilizantes ni pesticidas artificiales	Emisiones de metano	
POLIPROPILENO	Las fibras de PP podrían ser fabricadas de PP reciclado, lo cual podría disminuir el impacto ambiental, sin embargo, se debe estudiar	Mayor emisión de dióxido de carbono
		Emisiones de monóxido de carbono
		Emisión de metano

Fuente: Autor (2021).

Recomendaciones

A los investigadores que quieran ampliar el tema tratado o continuar con investigaciones en fibras de fique, se les recomienda lo siguiente:

- Realizar el análisis de ciclo de vida completo del concreto adicionado con fibras de fique, ya que en la presente investigación solo se realizó el ACV de la fibra de la “cuna a la puerta” de dicha fibra.
- Continuar con investigaciones acerca de la durabilidad de las fibras de fique y el tratamiento de estas, así como estandarizar la dosificación y distribución de las fibras al ser adicionadas al concreto como material de refuerzo.
- Desarrollar el análisis de ciclo de vida de la tumba a la tumba del concreto reforzado con fibras de polipropileno.
- En razón de que existen estudios acerca de fibras de polipropileno construidas a partir de polipropileno reciclado, se recomienda realizar investigaciones acerca de la resistencia del concreto adicionado con estas fibras de PP, junto con el análisis de ciclo de vida de las fibras y el ACV del concreto adicionado con dichas fibras. Asimismo, comparar técnica y ambientalmente el concreto adicionado con fibras de polipropileno virgen vs. fibras de polipropileno recicladas.
- Evaluar los impactos ambientales de la producción de fibras de polipropileno desde la extracción del petróleo crudo y su proceso de refinería.
- Realizar el mismo estudio del análisis de ciclo de vida de la fibra de fique, tomando los datos de las entradas y salidas en campo, y no de la literatura como se realizó en el presente estudio. Es decir, tomar los datos durante su proceso completo de manufactura, desde su cultivo, proceso de obtención y su proceso de lavado y secado.
- Comparar técnica y ambientalmente las fibras de fique con otras fibras naturales e identificar cuál de estas genera un menor impacto ambiental.

- Realizar el ACV de las fibras de fique de la “cuna a la puerta” con utilización de una máquina desfibradora eléctrica y no de combustible Diesel.
- Desarrollar estudios acerca del ciclo de vida de las fibras de sisal, cáñamo y plátano, fibras de potencial como material de refuerzo en concreto, ya que actualmente se conoce su viabilidad técnica más no su viabilidad ambiental. Además, conocer el ciclo de vida del concreto adicionado con dichas fibras.
- Para posible uso futuro de las fibras de fique, sería importante evaluar la posibilidad de producirlas en grandes cantidades, analizar los impactos ambientales asociados a su proceso de industrialización, como también el impacto económico y social.
- Asimismo, es importante evaluar y/o cuantificar las emisiones de metano que se generan por las fibras de fique en el ACV de cuna a la tumba, ya que en el presente estudio no se contempló dicho alcance.

Esta investigación permite establecer una base para los investigadores que quieran continuar con estudios en fibras de fique, fibra de potencial para ser utilizada como material alternativo para reducir la fisuración del concreto, ya que, como se mencionó, hasta el momento no existe un estudio ambiental de dichas fibras, aunque con la presente investigación se pudieron identificar los impactos que estas generan en el medio ambiente durante su proceso de manufactura. Sin embargo, es importante ampliar el límite o el alcance del sistema presentado, incluyendo más fases dentro del estudio, es decir, un estudio de la tumba a la tumba.

Otro de los temas que sería importante evaluar, es el análisis de costo en ciclo de vida, de las fibras de fique vs. las fibras de polipropileno.

Por último, esta investigación da apertura a un sinnúmero de posibilidades y potencialidades para el campo de las fibras naturales como las fibras de fique que pueden ser explotadas desde la academia, contribuyendo en las investigaciones sobre materiales sostenibles en la industria de la construcción, con base en que los investigadores concluyen que las fibras de fique permiten disminuir la fisuración y no afectan la resistencia a compresión y flexión del concreto. Además, habiendo identificado, por medio del ACV desarrollado, que en su proceso de manufactura, estas generan 57% menos CO₂ que las fibras de polipropileno.

Referencias Bibliográficas

- A.I.T. (2019). *The Environmental Impact of Polyethylene and Polypropylene - Acadian Industrial Textiles*. <https://acadiantextiles.com/news/the-environmental-impact-of-polyethylene-and-polypropylene/>
- Acero, J. (2017). *Pueden las fibras sintéticas reemplazar la armadura convencional?* https://www.aci-peru.org/eventos/IX_Conv_Nov/04_Juan_Carlos_Acero_-_Pueden_fibras_sinteticas_sustituir.pdf
- Acevedo, H., Vasquez, A., & Ramirez, D. (2013). Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 16(3), 91–117. <https://doi.org/10.15446/ga>
- Agronet. (2019). *Cadena agroindustrial del fique 2002-2008*. http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2008519105246_BULLETS_CADEFIQUE_2008.pdf
- Agronet, M. (2015). *EL FIQUE EN EL MUNDO*. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/El-fique-quiere-ser-de-talla-mundial---24-de-Noviembre-de-2015.aspx>
- Agudelo, H., Hernandez, A., & Cardona, A. (2012). *Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia*. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/30825/39307>
- Amaya, E., Molina, F., & Sánchez, M. (2018). *PROYECTO FINAL PRODUCCIÓN DE POLIPROPILENO*. <https://core.ac.uk/download/pdf/186628957.pdf>
- Antillón, J. (2016, January). *Uso de fibras en el concreto*. <http://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/enero2016/experto.pdf>
- Artesanías de Colombia. (2014). *No Fibras vegetales: elemento básico de las artesanías*. http://www.artesantiasdecolombia.com.co/PortalAC/C_noticias/fibras-vegetales-elemento-basico-de-las-artesantias_5079
- BanRep. (2012). *AGRICULTURA*. <https://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/485/?sequence=1>
- Begum K, & Islam MA. (2013). Natural Fiber as a substitute to Synthetic Fiber in Polymer Composites: A Review. In *Research Journal of Engineering Sciences* (Vol. 2, Issue 3). www.isca.in
- Beltrán, Ó. (2005). *Revisiones sistemáticas de la literatura*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99572005000100009
- Bohórquez, J. (2011). *Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (fibra de fique)*. https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/1137/CONCRETO_FIBRA_FIQUE.pdf?

- Duque, D. (2011). *Optimización de los subproductos del Fique*. https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/78814/1/duque_sistema_fique_2011.pdf
- Duran, L. M. (2017). *DEFINICIÓN DE CRITERIOS SOSTENIBLES PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES DE VIVIENDAS EN BOGOTÁ*. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15397/1/Monica_Duran_Definicion_de_Criterios_de_Sostenibilidad.pdf
- Ecoclimatico. (2008). *Degradación del plástico*. <https://www.ecoclimatico.com/archives/degradacion-del-plastico-137>
- EL ESPECTADOR. (2015). *Fibra de plátano mejora propiedades del concreto - ELESPECTADOR.COM*. <https://www.elespectador.com/noticias/actualidad/fibra-de-platano-mejora-propiedades-del-concreto-articulo-543982>
- Enshassi, A., Rizq, E., & Kochendoerfer, B. (2014). An evaluation of environmental impacts of construction projects. *Revista Ingenieria de Construccion*, 29(3), 234–254. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002>
- Escamilla, Z., & Wallbaum, H. (2011). Environmental Savings from the use of Vegetable Fibres as Concrete Reinforcement. *Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction(ISEC-6)*, 1315–1320. https://doi.org/10.3850/978-981-08-7920-4_S3-M006-cd
- Espinoza, M. (2015). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23026/1/tesis.pdf>
- Expeditio. (2016). *Máquina que extrae fibra, jugo y bagazo del fique recibe patente de utilidad por parte de la SIC | Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano*. <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/destacadas/expeditio/264566/maquina-que-extrae-fibra-jugo-y-bagazo-del-fique-recibe-patente-de-utilidad-por-parte-de-la-sic>
- Fenalfique. (2019). *Cartilla técnica del cultivo de fique*. https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Normatividad/2019-06-30_Cartilla_Técnica_del_Cultivo_del_Fique.pdf
- Ferreira, C. R., Tavares, S. S., Ferreira, B. H. M., Fernandes, A. M., Fonseca, S. J. G., De Souza Oliveira, C. A., Teixeira, R. L. P., & De Araújo Gouveia, L. L. (2017). Comparative study about mechanical properties of structural standard concrete and concrete with addition of vegetable fibers. *Materials Research*, 20, 102–107. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0905>
- Ferreira González, I., Urrútia, G., & Alonso-Coello, P. (2011). Systematic reviews and meta-analysis: Scientific rationale and interpretation. *Revista Espanola de Cardiología*, 64(8), 688–696. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2011.03.029>
- GaBi software. (2019). *Process data set: Polypropylene fibers (PP); crude oil based; production mix, at plant; without additives (en)*. <http://gabi-documentation-2020.gabi-software.com/xml-data/processes/db00901b-338f-11dd-bd11-0800200c9a66.xml>
- González, L. (2010). *Generalidades sobre las fibras artificiales*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/10925/luisoctaviogonzalezsalcedo.20124.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- González, L. (2010). *GENERALIDADES SOBRE LAS FIBRAS ARTIFICIALES*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/10925/luisoctaviogonzalezsalcedo.20124.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Las fibras de polipropileno son,tienen una baja conductividad térmica.>
- Grieco, L. (2012). *LA DIMENSIÓN GRUPAL DE LA RELACIÓN CON EL SABER*.

https://psico.edu.uy/sites/default/files/tesis_de_maestria._luis_grieco._final.pdf

- Gurunathan, T., Mohanty, S., & Nayak, S. (2015). *A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives*. <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.unal.edu.co/science/article/pii/S1359835X15002067?via%3Dihub>
- Haya, E. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. file:///C:/Users/ldemoya/Downloads/teoria_acv_migma1(1).pdf
- Hernández, R., Collado, F., & Babiata, C. (2014). *Metodología de la investigación* (S. A. D. C. V. INTERAMERICANA EDITORES (Ed.); Sexta edic). <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- ICONTEC. (2007). *Explorando el Concreto Reforzado con Fibras (CRF) - Materia y producto*. <http://www.imcyc.com/ct2008/feb08/materia.htm>
- IHOBE. (2009). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y HUELLA DE CARBONO*. <https://www.ihobe.eus/publicaciones/analisis-ciclo-vida-y-huella-carbono-dos-maneras-medir-impacto-ambiental-un-producto>
- Jaramillo, P. (2017). *Mejora de las condiciones de durabilidad de la fibra de fique como elemento reforzante del concreto*. https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5009/Mejora_condiciones_durabilidad_fibra_fique.pdf?sequence=1
- Kaminski, S., Lawrence, A., & Trujillo, D. (2018, January). *Guía de diseño para la vivienda de bahareque encementado*. <https://bambuecuador.files.wordpress.com/2018/01/2015-guia-de-disencc83o-para-viviendas-de-bahareque-encementado.pdf>
- Khelifa, M. R., Ziane, S., Mezhoud, S., Ledesert, C., Hebert, R., & Ledesert, B. (2021). Compared Environmental Impact Analysis of Alfa and Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00555-x>
- Korol, J., Hejna, A., Burchart, D., & Wachowicz, J. (2020). *Comparative Analysis of Carbon, Ecological, and Water Footprints of Polypropylene-Based Composites Filled with Cotton, Jute and Kenaf Fibers*. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/16/3541/htm>
- Kubair, S., & Rama, K. (2020). Impact of locally available sustainable materials on the overall economy of the construction sector – A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.343>
- Lara Auersvaldt, B., Antonio Lay, L., & Liebl Miranda, T. (2019). *Incorporação de Fibras Vegetais de Bambu ao Concreto em Substituição à Fibras Sintéticas*.
- Lucena, M. P., Suarez, A., & Zamudio, I. (2009). DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DE FIBRAS DE BAMBU PARA APLICACIONES AERONAUTICAS. In *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (Vol. 1, Issue 3). www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html
- Mannheim, V., & Simenfalvi, Z. (2020). Total life cycle of polypropylene products: Reducing environmental impacts in the manufacturing phase. *Polymers*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/POLYM12091901>
- Mariano. (2011). *Polipropileno | Tecnología de los Plásticos*. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/polipropileno.html>
- Marlinwire. (2020). *7 Need-to-Know Polypropylene Material Properties*. <https://www.marlinwire.com/blog/7-need-to-know-polypropylene-material-properties>

- Martínez, C., Bueno, S., & Dondi, M. (2015). *Study of the Mechanical Properties of Concrete with Sisal and Polypropylene Fibers*. <https://www.scientific.net/KEM.663.115>
- Matmatch. (2020). *Polypropylene: Properties, Processing, and Applications - Matmatch*. <https://matmatch.com/learn/material/polypropylene>
- Mendoza, C., Aire, C., & Dávila, P. (2011, June). *Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112011000100003
- Metropol. (2020). *Análisis de ciclo de vida*. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/analisis-de-ciclo-de-vida.aspx>
- Miller, D. (2018). *What Are the Differences Between Micro and Macro-Synthetic Fibers? | All Things Fibers*. <https://www.allthingsfibers.com/2018/03/know-macrofibers-microfibers/>
- Minagricultura. (2018). *Cadena del fique y su agroindustria*.
- Ministerio de Agricultura. (2014). Área sembrada y área cosechada del cultivo de fique. *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. <https://www.agronet.gov.co/Documents/Fique.pdf>
- Mohajerani, A., Qun, S., Mirzababaei, M., & Arulrajah, A. (2019). *Amazing Types, Properties, and Applications of Fibres in Construction Materials*. https://www.researchgate.net/publication/335016007_Amazing_Types_Properties_and_Applications_of_Fibres_in_Construction_Materials
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., & Liberati, A. (2016). *Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement*. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2174-51452016000200010
- Montoya, D., Jaramillo, F., & López, O. (2005). *Construcción de muros en tapia y bahareque*. https://repositorio.sena.edu.co/sitios/albanileria_restauracion_edificaciones/construccion_muros_tapia_bahareque.html#:~:text=La Tapia Pisada es un,de los muros de piedra
- Mosquera, C., & Morales, S. (2008). *Evaluación de los efluentes provenientes de la agroindustria del fique en el municipio de Totoró - Cauca*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612008000200007
- NBMCW. (2011). *Polypropylene Fiber Reinforced Concrete: An Overview*. <https://www.nbmcw.com/tech-articles/concrete/26929-pfr.html>
- Ochoa, C., & Rivera, J. (2014). *Análisis del ciclo de vida de tres sistemas de producción de biodiesel*. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1423&context=ing_ambiental_sanitaria
- Opemed. (2020). *El (complejo) proceso del reciclaje del plástico*. <http://gestionderesiduosonline.com/el-complejo-proceso-del-reciclaje-del-plastico/>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. *CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>
- Packaging. (2014). *Crecerán las ventas mundiales de polipropileno*. <http://www.packaging.enfasis.com/notas/71270-creceran-las-ventas-mundiales-polipropileno->
- Paricaguán, B. (2015). *"CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO Y FISICOQUIMICO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS NATURALES DE COCO Y BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR PARA SU USO*.
- Peñaranda, L., Montenegro, S., & Giraldo, P. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales

- en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*.
<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2040/2293>
- Pertuz, A. M. (2010). *CONSTRUCCIÓN Y MEDIO AMBIENTE*. 1, file:///C:/Users/WS/Downloads/119-Texto%20del%20ar. file:///C:/Users/WS/Downloads/119-Texto del artículo-383-1-10-20141013.pdf
- Pinto, C., & Figueroa, L. (2016). *Determinación del comportamiento mecánico de un concreto adicionado con fibra a partir de su resistencia a la tracción, flexión y compresión*. [UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER].
http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000657522
- Pinzón, S. (2013, October). *Análisis de la resistencia compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique*. <https://es.scribd.com/document/213023213/Analisis-de-la-resistencia-compresion-y-flexion-concreto-modificado-fibra-fique>
- Plastics Insight. (2016). *Polypropylene Production Capacity, Market and Price*.
<https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polypropylene/>
- PREAD. (2020). *Enfoque de ciclo de vida nivel IV PREAD*.
https://www.academia.edu/43453620/ENFOQUE_DE_CICLO_DE_VIDA_NIVEL_IV_PREAD
- Ramezaniapour, A. A., Esmaeili, M., Ghahari, S. A., & Najafi, M. H. (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, 44, 411–418.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076>
- Ramírez, V., & Arango, J. (2014). *Evolución de las teorías de explotación de recursos naturales: hacia la creación de una nueva ética mundial*.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321732142017>
- Rieznik, N., & Hernández, A. (2005). *Análisis de ciclo de vida*. <http://habitat.aq.upm.es/temas/a-analisis-ciclo-vida.html>
- Rilon. (2020). *Polypropylene Fiber: Properties, Uses, Products, Structure | Rilon*.
<https://rilonfibers.com/blog/polypropylene-fiber/>
- Rojas, E. (2016). *Análisis de las propiedades mecánicas de un concreto convencional adicionando fibra de cáñamo*. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/6831/4/TESIS-ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO CONVENCIONAL ADICIONANDO FIBRA DE CÁÑAMO.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/6831/4/TESIS-ANÁLISIS_DE_LAS_PROPIEDADES_MECÁNICAS_DE_UN_CONCRETO_CONVENCIONAL_ADICIONANDO_FIBRA_DE_CÁÑAMO.pdf)
- Ruiz, E. (2016). *El análisis de ciclo de vida. Metodología de decisión y evaluación ambiental en el sector de la edificación*. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/66016/TFG_Enrique Ruiz Lopez_El análisis de ciclo de vida. Metodología de decisión y evaluación del impacto ambiental en el sector de la edificación.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/66016/TFG_Enrique_Ruiz_Lopez_El_análisis_de_ciclo_de_vida_Metodología_de_decisión_y_evaluación_del_impacto_ambiental_en_el_sector_de_la_edificación.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Salas, A., & Barbero, M. (2018). *IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS CON FIBRAS VEGETALES QUE SEAN SOSTENIBLES EN CONTEXTOS DE PRECARIEDAD*.
https://www.researchgate.net/publication/331743016_IMPLEMENTACION_DE_TECNOLOGIAS_CONSTRUCTIVAS_CON_FIBRAS_VEGETALES_QUE_SEAN_SOSTENIBLES_EN_CONTEXTOS_DE_PRECARIEDAD
- Sanes, D. (2017). *Influencia de microfibras de polipropileno y microsílíce en la resistencia de concretos de 4000 y 3000 psi*.
<https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/2366/0070409.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Scopus - Analyze search results Polypropylene fibers in concrete reinforcement 2010 - 2020. (2020). <https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/term/analyzer.uri?sid=02f903f2d0e2e8526dfcfd921d1617b7&origin=resultslist&src=s&sort=plf-f&sdt=cl&sot=b&sessionSearchId=02f903f2d0e2e8526dfcfd921d1617b7&count=591&analyzeResults=Analyze+results&cluster=scopubyr%2C%222009%22%2C%222008%22%2C%222007%22%2C%222006%22%2C%222005%22%2C%222004%22%2C%222003%22%2C%222002%22%2C%222001%22%2C%222000%22%2C%221999%22%2C%221998%22%2C%221997%22%2C%221996%22%2C%221995%22%2C%221994%22%2C%221993%22%2C%221992%22%2C%221991%22%2C%221990%22%2C%221989%22%2C%221988%22%2C%221987%22%2C%221986%22%2C%221985%22%2C%221984%22%2C%221983%22%2C%221982%22%2C%221981%22%2C%221980%22%2C%221979%22%2C%221977%22%2C%221976%22%2C%221975%22%2C%221972%22%2C%221970%22%2C&txGid=f7c45b67cf03b55f9cc04ce4540a3412>
- Scopus - Analyze search results Natural Fiber for concrete reinforcement. (2020). <https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/term/analyzer.uri?sid=d23c6f1d532ffe78694dc7412bb26df9&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28Natural+fibers+for+concrete+reinforcement%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=56&count=529&analyzeResults=Analyze+results>
- Scopus - Analyze search results synthetic fibers for concrete. (2020). <https://www-scopus-com.ezproxy.unal.edu.co/term/analyzer.uri?sid=4c65be8f13a23c3225f348d9a2db964d&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28+synthetic+fibers+for+concrete+reinforcement%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=59&count=415&analyzeResults=Analyze+results&txGid=9cd471b12b23e490e447a9a1f39053a4>
- Serrano, P. (2014). *Análisis de ciclo de vida para el diseño de materiales sostenibles*. <https://www.certificadosenergeticos.com/analisis-ciclo-vida-diseno-materiales-sostenibles>
- Sika. (2012). *SikaFiber® M-12*. <https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/a2fe4809-d2fa-3abc-9918-c90f8077310f/SikaFiber M-12.pdf>
- Sika. (2020). *Concreto reforzado con fibras*. file:///C:/Users/ldemoya/Downloads/Concreto reforzado con fibras (16).pdf
- Sikra, S. (2017). *How Does Construction Impact the Environment?* . <https://gocontractor.com/blog/how-does-construction-impact-the-environment/>
- Silva, A. (2017). *ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS E POLIPROPILENO PARA USO EM PAREDES ESTRUTURAIS*. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1101>
- Silva, L., Vecino, P., & Jiménez, H. (2018). *TAPIA PISADA COMO TÉCNICA CONSTRUCTIVA VERNÁCULA*. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/13851/2018pedrovecinoluissilva.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tapia, C., Paredes, C., Simbaña, A., & Bermúdez, J. (2006). *Aplicación de las Fibras Naturales en el Desarrollo de Materiales Compuestos y como Biomasa*. <http://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/210>
- Terreros, L., & Carvajal, I. (2016). *ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO CONVENCIONAL ADICIONANDO FIBRA DE CÁÑAMO*. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/6831/4/TESIS-ANÁLISIS DE LAS>

PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO CONVENCIONAL ADICIONANDO FIBRA DE CÁÑA.pdf

- Torre, N. (2012). *Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV) de una planta de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU)*. <http://repositorio.unican.es:8080/xmlui/bitstream/handle/10902/728/345763.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Toxement. (2018). *GUÍA PARA EL USO DE FIBRAS SINTÉTICAS DE TOXEMENT EN EL CONCRETO*. http://www.toxement.com.co/media/3381/fibras_sinteticas.pdf
- Tuozzo, M. V. (2017). *Como afecta a las personas y el medio ambiente el uso de fibras manufacturadas*. http://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/42367_160627.pdf
- Twenergy. (2019). *Ciclo de vida de producto*. <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/curiosidades/ciclo-de-vida-de-producto-1398/>
- Umacon. (2016). *La importancia de la Construcción Sostenible*. <http://www.umacon.com/noticia.php/es/la-importancia-de-la-construccion-sostenible/424>
- UPC. (2013). *Análisis del Ciclo de Vida*. [https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/Analisis del Ciclo de Vida.pdf](https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/Analisis%20del%20Ciclo%20de%20Vida.pdf)
- Vairagade, V. S., & Kene, K. S. (2013). Strength of normal concrete using metallic and synthetic fibers. *Procedia Engineering*, 51, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.020>
- Vargas, L. (2020). *Impactos ambientales de la producción petrolera en Colombia y su relación con la innovación tecnológica en los últimos quince años*. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7843/1/463974-2020-I-GA.pdf>
- Velásquez, S., Pelaéz, G., & Giraldo, D. (2016). *Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos*.
- Vidaud, I., Frometa, Z., & Vidaud, E. (2015). *Una aproximación a los concretos reforzados con fibras*. TECNOLOGIA. <http://imcyc.com/revistacyt/pdf/julio2015/tecnologia.pdf>
- Xu, H., Shao, Z., Wang, Z., Cai, L., Li, Z., Jin, H., & Chen, T. (2020). Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Construction and Building Materials*, 261, 120610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120610>
- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications*. <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/case-study-research-and-applications/book250150>
- ZEO. (2020). *¿Cuánto CO2 emite el plástico? - Plataforma ZEO*. <https://plataformazeo.com/es/cuanto-co2-emite-el-plastico/>
- Zhang, T., Yin, Y., Gong, Y., & Wang, L. (2020). Mechanical properties of jute fiber-reinforced high-strength concrete. *Structural Concrete*, 21(2), 703–712. <https://doi.org/10.1002/suco.201900012>

Anexo A: Investigaciones desarrolladas

Tabla 1. Investigaciones desarrolladas en la aplicación de la fibra de guadua como material de refuerzo en concreto en Colombia.

Tipo Investigación	Año	Título	Conclusión	Cuestionamientos	Fuente
Artículo	2019	Composites de cemento Portland y fibras de Guadua angustifolia Kunth de Colombia	Esta investigación ha presentado resultados prometedores para el uso de fibras de bambú, no solo en cemento Portland sino también en otros tipos de materiales a base de cemento. Como el proceso se llevó a cabo completamente a mano y no se utilizó ningún otro tratamiento fisicoquímico, el material compuesto se puede utilizar en aplicaciones como la construcción de viviendas de una o dos plantas. Es un procedimiento simple que ciertamente disminuye los costos de producción y se puede implementar en cualquier lugar. El uso de tan solo 4.0 y 8.0% en peso de fibras dio una mejora de más del 100% con respecto a la muestra sin ningún contenido de fibra (muestra de referencia). los desechos de madera podrían usarse sin más tratamiento químico y, por lo tanto, contribuir a la adopción de soluciones ecológicas.	1. Estrategias para mejorar la selección de las fibras 2. Dosificación de las fibras.	(Quintero-Dávila et al., 2019)
Tesis	2019	Estudio de la resistencia mecánica del concreto reforzado con fibras de guadua angustifolia kunth.	La adición de fibras de guadua angustifolia Kunth en estado natural (CH=10.8%) a la muestra de concreto, mejoró la resistencia a la compresión del concreto en comparación con el concreto estándar. En términos generales la fibra de guadua angustifolia Kunth genera que el concreto sea más resistente, dúctil cuando es sometido a fuerzas axiales de compresión. Se determinó que el uso de guadua angustifolia Kunth como material para la construcción es bueno gracias a sus propiedades de resistencia, por lo tanto, es posible diseñar un concreto reforzado con fibras naturales que presente mayor capacidad de carga y que a la vez sea más amigable con el medio ambiente.	1. Se recomienda realizar una investigación que analiza el comportamiento del concreto con porcentajes menores que el propuesto (123gr.) 2. Se recomienda emplear estudios adicionales relacionados con la impermeabilización de las fibras de guadua con el fin de no tener inconvenientes a futuro con la descomposición del material.	(Bejarano, 2019)
Tesis	2018	Evaluación de la utilización de las fibras de guadua como refuerzo del concreto para minimizar el proceso de fisuración.	Se evidenció con las muestras de concreto realizadas con las fibras de guadua, que el tamaño de las fibras influyo de forma positiva ya que, se obtuvo una buena adherencia del concreto con las fibras. También determinaron que si bien su trabajabilidad es buena el índice de absorción es mayor, lo que género que algunos de los cilindros presentasen vacíos significativos en comparación con otros. Se logro determinar que, aunque el concreto que obtuvo mayor resistencia a la tracción indirecta fue el concreto convencional, el concreto con fibras de guadua tubo un índice de fisuración menor.	1. Tras obtener las resistencias máximas de los cilindros con adición de fibras de guadua se concluye que la proporción y dimensiones de fibras fue adecuada, teniendo presente que para futuras investigaciones se debe calcular una mayor cantidad de agua lo cual permita una mejor manejabilidad de la mezcla. 2. Se recomienda hacer un nuevo trabajo investigativo variando la proporción de agregado de fibra y de esta manera se podrá hacer un comparativo para determinar en qué cantidad porcentual resulta ser más beneficiosa la fibra.	(Martínez & Poveda, 2018)
Tesis	2019	Estudio de la utilización de fibras de guadua como refuerzo del concreto	Tras obtener las resistencias máximas de los cilindros con adición de fibras de guadua se concluye que la proporción y dimensiones de fibras fue adecuada, teniendo presente que para futuras investigaciones se debe calcular una mayor proporción de agua lo cual permita una mejor manejabilidad de la mezcla.		(Vanegas, Poveda, & Martínez, 2019)

Fuente: Autor, (2020).

Tabla 2. Investigaciones realizadas con fibras de coco para el reforzamiento del concreto.

Tipo Investigación	Año	Título	Conclusión	Cuestionamientos	Fuente
Artículo	2019	Fibre reinforced concrete containing waste coconut shell aggregate, fly ash and polypropylene fibre	El uso de cáscara de coco como agregado grueso en el hormigón no solo conserva el granito, los recursos naturales que se agotan más rápidamente, sino que también proporciona la solución para la eliminación de los desechos de cáscara de coco en la India. Cuando se utilizan cenizas volantes en hormigón, se reduce el agotamiento de la piedra caliza, una materia prima necesaria para la producción de cemento y, por lo tanto, se mejora el aspecto de sostenibilidad en la producción de hormigón. Esto ayudará significativamente a la conservación de la piedra caliza y reducirá efectivamente la emisión de CO ₂ , NO _x y otros gases de efecto invernadero al medio ambiente. Se puede observar que la adición de fibra mejoró el comportamiento mecánico del hormigón producido con la utilización combinada de cáscara de coco y cenizas volantes y se puede utilizar para aplicaciones estructurales.		(Prakash, Thenmozhi, Raman, & Subramanian, 2019)
Tesis	2018	Estudio del comportamiento mecánico del mortero reforzado con fibra de coco y modificado con óxido de hierro.	La fibra bloquea la propagación de las grietas, uniendo el material de manera que se mantiene unido aún después de fracturarse. Esto se pudo observar tanto en las probetas de compresión, como en las de flexión. Sin embargo, es en las de flexión en las que se puede observar que la fibra hace que las piezas, ya fracturadas, se mantengan unidas y puedan soportar mayor carga, incluso después de su falla inicial.	Teniendo en cuenta las conclusiones y resultados obtenidos en el trabajo de investigación se recomiendan trabajos futuros que estudien el tema de la dispersión y la distribución de las fibras dentro de las probetas, además de su resistencia con tal de poder entender de mejor manera las ventajas mecánicas de la adición de la fibra	(Quirós, 2018)
Tesis	2017	Caracterización mecánica de fibras de coco como refuerzo de materiales compuestos poliméricos.	Se determinó que entre más grande sea la fibra de coco, saldrá con más imperfecciones, ya que, entre más grande, mayor el porcentaje de impurezas. Lo cual afecta en el funcionamiento del material. Se observó que, para una buena utilización de las fibras de coco, se debe tener en cuenta de qué forma se extrae el material, ya que, dependiendo del corte o extracción de esta, se determina la resistencia. En conclusión, al ensayar 7 muestras representa el 23% de las muestras mínimas que se requieren. Lo cual se puede decir que no es suficiente predecir las fracturas con los datos obtenidos, por lo cual se requiere ensayar más muestras.	Realizar estudios para el tratamiento en las porosidades de las fibras, para minimizar concentradores de esfuerzos. Realizar estudios en el suelo en distintas zonas para establecer una relación entre las propiedades mecánicas de las fibras del coco y su origen de procedencia. Establecer una relación entre el diámetro y la resistencia. Establecer relación entre las edades del coco y las propiedades mecánicas de la fibra de Coco.	(Escudero & Aristizábal, 2016)

Fuente: Autor, (2020).

Tabla 3. Investigaciones realizadas en fibras de bagazo de caña como material de refuerzo en el concreto en Colombia

Tipo Investigación	Año	Título	Conclusión	Cuestionamientos	Fuente
Tesis	2020	Análisis de un concreto convencional con un concreto con material alternativo (bagazo de caña de azúcar)	Se observa que mediante la adición de fibra de bagazo de caña de azúcar la resistencia a la compresión del concreto tiene una reacción inversamente proporcional, resultando que, a mayor cantidad de fibra la resistencia disminuye, en base a este análisis se concluye que un porcentaje óptimo de fibra en el concreto se encuentra entre el 0,5- 2,5%.		(Jimenez & Torres, 2020)
Tesis	2019	Influencia de la fibra de caña seca y húmeda en un 3% adicionada a un concreto convencional, comparando la resistencia a compresión y tensión indirecta.	Con base en los cálculos hechos se pudo reconocer que el concreto con la adición de las fibras húmedas en un 3%, obtiene una resistencia mecánica en tensión muy cercano al de la muestra patrón de concreto convencional. Se considera que al ser embebidas las fibras en el concreto de manera aleatoria es la mejor opción al trabajar con fibras naturales, ya que estará uniformemente en concreto y se comportará mejor. Se utilizó la cal hidratada para la inmunización de las fibras, pero al cambiar el elemento de inmunizado a estas, puede minimizar la porosidad de la fibra y así mismo evitar que absorba el agua del diseño de la mezcla	Se recomienda hacer un estudio para recocer que impacto tiene en el sector azucarero la implementación de la fibra en concreto y así mismo que costos trae consigo el proceso de fabricación del material. Investigar la durabilidad del concreto cuando es expuestos al ambiente natural a largo plazo en lugares con diversidad de climas y las propiedades mecánicas de tenacidad e impacto de los concretos con fibras naturales.	(Briceno & Baquero, 2019)
Tesis	2019	Análisis de las propiedades estructurales del concreto modificado con la fibra de bagazo de caña	Se pudo identificar que la fibra de bagazo de caña presenta una buena adherencia con respecto a la matriz cementante, por tanto, se puede concluir que la fibra de bagazo de caña es un material alternativo factible para implementarse en la mezcla del concreto. Con los resultados obtenidos en los ensayos a compresión se observó que el porcentaje óptimo y que cumple con los parámetros mínimos de resistencia a la compresión establecidos en la NSR- 10, corresponde a la muestra de concreto con 0,6% de fibra de bagazo de caña de azúcar, por lo cual se concluye que es viable la adición de dicho porcentaje de fibra de bagazo de caña en la mezcla de concreto de 3000 psi.	Se recomienda estudiar la adición de fibra de bagazo de caña de azúcar en el concreto como refuerzo a tensión y cortante debido a que en el presente trabajo de investigación no se evaluó dicho parámetro. También se recomienda evaluar la fibra de bagazo de caña como agregado y no como fibra.	(Huertas & Martínez, 2019)
Tesis	2013	Evaluación de la resistencia de una mezcla de concreto, al adicionarle fibra natural tipo bagazo de caña panelera generada en el departamento de Nariño	El concreto fibroreforzado con bagazo de caña de azúcar, permite a las estructuras después de la fisuración inicial o falla, continuar absorbiendo carga y por tanto la estructura continúa funcionando. Se observo que la densidad en el concreto con estas fibras disminuye por ende su peso, factor que es muy importante en el momento de considerar las cargas muertas por peso propio en las estructuras. Se aprecio el efecto positivo de la incorporación de fibra al concreto ya que, al momento de la falla el concreto se mantiene unido lo cual se debe a una buena adherencia de la fibra con la matriz.		(España & Molina, 2013)

Fuente: Autor, (2020).

Tabla 4. Investigaciones desarrolladas de fibras de cáñamo para el reforzamiento del concreto en Colombia.

Tipo Investigación	Año	Título	Conclusión	Cuestionamientos	Fuente
Tesis	2017	Análisis mecánico de un concreto con adición del 2% de fibra natural de cáñamo	Los resultados de la investigación evidencian que la implementación de las fibras permite al concreto la adherencia de los materiales durante y después de realizar cada uno de los ensayos; como tal permiten que el concreto presente agrietamiento normal después de la falla, pero es controlado por las fibras quienes impiden la prolongación de dichas grietas haciendo que estas terminen allí, brindando ductilidad (carencia notable del concreto). Este resultado es importante ya que puede ser analizado para el desarrollo de nuevos materiales de construcción con un enfoque sostenible.		(Mora, 2017)
Artículo	2016	Uso de la fibra de cáñamo para mejorar las propiedades del concreto	Con base a los ensayos se afirma que la fibra de cáñamo en la concreto ayuda principalmente a evitar el agrietamiento y a un mejor aglutinamiento de los materiales para que al momento de la rotura tanto a compresión como a flexión, el concreto permanezca unido, de lo cual se deduce una buena adherencia de la fibra a la matriz; es el llamado fenómeno de puenteo, que mejora de varias maneras la tenacidad de la matriz, ya que una grieta que se mueva a través de la matriz encuentra una fibra y esta la obliga a que no se prolongue o que se siga abriendo,	Se recomienda continuar con la investigación en donde en las siguientes propuestas se investigue con diferentes porcentajes de adición de fibra, además de realizar ensayos a la tracción indirecta.	(Terreros & Carvajal, 2016)

Fuente: Autor, (2020).

Tabla 5. Investigaciones desarrolladas en concreto reforzado con fibras vegetales en Latinoamérica.

Tipo Investigación	Año	País	Fibra	Título	Conclusión	Cuestionamientos	Fuente
Artículo	2019	Brasil	Bambú	Incorporación de fibras vegetales de bambú en el hormigón para sustituir las fibras sintéticas	Es posible probar la sustitución viable de fibras sintéticas por fibras de bambú en relación con su resistencia mecánica como materiales de construcción en obra civil. De esta forma, las fibras de bambú tienen resultados prometedores en su desempeño, debido a que sus características mecánicas son compatibles con las fibras de poliéster y polietileno. Su mayor ventaja sobre ellos está en la preservación ambiental y los beneficios sociales, colaborando en la sostenibilidad global y tendiendo a reducir los costos de fabricación debido a la necesidad de un bajo grado de industrialización y bajo consumo energético en la producción, baja generación de residuos, alta productividad, y facilidad para obtener el producto.	Con el tiempo, la fibra puede perder esta humedad y disminuir su volumen, dando como resultado fallas y vacíos en la matriz, donde aparecerán puntos frágiles. Estas circunstancias, junto con el hecho de que la fibra de bambú es de origen vegetal y está sujeta a ataques xilófagos y fúngicos, descomposición y heterogeneidad, requiere más estudios sobre la durabilidad de estos composites cuando no se tratan químicamente y cómo se ve afectada su resistencia en tiempo extraordinario.	(Lara Auersvaldt, Antonio Lay, & Liebl Miranda, 2019)
Artículo	2019	Brasil	Sisal	Estudio comparativo del comportamiento mecánico y la durabilidad de hormigón reforzado con polipropileno y fibra de sisal	La fibra de sisal podría proporcionar el mismo nivel de resistencia residual que la fibra de polipropileno, siempre que se considere la equivalencia de las dosis de cada fibra. La alta absorción de agua de fibras de sisal debe ser la razón del peor rendimiento en comparación con la misma dosis de fibras de polipropileno en un matriz cementosa, evidenciada por las pruebas de extracción. Por lo tanto, a dosis más altas de fibras de sisal, la cantidad de fibras en una sección agrietada aumentó lo suficiente para compensar la menor eficiencia de su interfaz fibra-matriz. Por lo tanto, el uso de fibras de sisal como refuerzo del hormigón es viable desde el punto de vista mecánico y en relación con su durabilidad, teniendo en cuenta la necesidad de mayores dosis y un uso de una matriz adecuada.		(Castoldi, Silva de Souza, & Andrade Silva, 2019)
Tesis	2017	Brasil	Sisal y ramio	Estudio de las propiedades del hormigón con la adición de fibras vegetales y polipropileno para su uso en muros de carga	Se evaluó la contracción por secado restringido, por la prueba del anillo, además de las propiedades mecánicas y físicas. Los niveles utilizados fueron 0,25% y 0,5% para las fibras vegetales y sólo 0,25% para la fibra de polipropileno, debido a que el contenido de 0,5% de esta fibra presentaba una trabajabilidad extremadamente baja, haciendo imposible su aplicación. En cuanto a la contracción restringida, se observó que la adición del 0,25% de fibras no dio lugar en el aumento del rendimiento en comparación con el hormigón sin la adición de fibras. Pero la adición de 0,5% de fibra vegetal ha mostrado resultados satisfactorios, siendo superior a hormigón de referencia (sin fibras añadidas). En cuanto a la absorción por capilaridad, el hormigón con la adición de fibras vegetales mostró un mejor rendimiento, es decir, reducción de la absorción de la capilaridad. Así, es posible reemplazar la fibra de polipropileno por fibras vegetales, principalmente sisal, debido a la proximidad en los resultados encontrados, pero deben realizarse más estudios para demostrar la eficacia de los dos tipos de fibras utilizadas.	Estudios relativos a la evaluación microestructural del hormigón con adición de fibras, evaluando, entre otros, el efecto de la capilaridad. Posibles acciones para mejorar la distribución de la fibra en la matriz. Adición de otras fibras vegetales que ya hayan sido estudiadas en compuestos de cementos como, por ejemplo, la fibra de coco.	(Silva, 2017)

Tesis	2011	Costa Rica	Bambú	Comparación del bambú con el acero como material de refuerzo a flexión en concreto	<p>En la planta de bambú y en las probetas utilizadas para la presente investigación, las fibras de esta constituyen el componente de mayor resistencia ante las cargas de tracción, ya que las mismas fallan al ser sometidas a un esfuerzo mayor que las probetas con nudo.</p> <p>El uso de probetas de bambú como refuerzo implica que se disminuya la capacidad del concreto en la fibra a tensión cuando este se somete a flexión, esto debido a los valores tan cercanos que existen entre el módulo de elasticidad del bambú y del concreto.</p>	Un estudio más amplio utilizando el bambú como refuerzo permitiría establecer mayores parámetros de diseño y así definir los tipos de elementos que se pueden reforzar con bambú.	(Poveda, 2011)
Tesis	2015	Ecuador	Coco	Adición de la fibra de coco en el hormigón y su incidencia en la resistencia a compresión	<p>El hormigón elaborado a base de la fibra de coco con una dosificación de 210 kg/cm² dio aproximadamente el 92 % de su resistencia requerida, es por eso por lo que además de su buena resistencia se lo considera un hormigón liviano debido a su baja densidad obtenida.</p> <p>El reforzamiento del concreto mediante fibras mejora la tenacidad de la matriz, evitando las fisuras en el concreto. Los hormigones desarrollados con fibra de coco pueden ser una alternativa para la construcción de cerramientos, aceras, bordillos, estos tipos de hormigones son ecológicos, livianos, que los hormigones convencionales utilizados tradicionalmente en nuestro País.</p>		(Rojas, 2015)
Tesis	2015	Ecuador	Bagazo de caña	Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar	<p>La resistencia a la compresión simple, con la adición de fibra de 1,5% del volumen de la mezcla, se obtuvo una resistencia de diseño del 85% a los 28 días de fraguado, lo cual se recomienda su uso en capas de contra piso y pavimentos.</p> <p>Sobre el proceso de degradación y protección de agentes físicos y químicos en las fibras naturales, se optó por utilizar cal viva para la protección del cuerpo fibroso y se identificó que la fibra no perdió resistencia dentro de la matriz de cemento.</p> <p>Un concreto reforzado con fibra natural tiene un costo de producción menor, el ahorro oscila entre un 8% con respecto a la fibra sintética, 17% con respecto a la fibra de acero.</p>	Evaluar cómo prevenir la degradación acelerada de la fibra cuando entra en contacto con el cemento.	(Espinoza, 2015)
Artículo	2017	Brasil	Bambú y bagazo de caña	Estudio comparativo sobre las propiedades mecánicas del concreto estándar y el concreto con adición de fibras vegetales	<p>Se descubrió que todos los concretos producidos cumplan con la resistencia mínima de 20 MPa recomendada por NBR 6118 para fines estructurales y se observó un aumento de la resistencia a la compresión en las probetas con la adición de fibras orgánicas.</p> <p>El concreto con adición del 2% v/p de fibras de bambú mostró una mejor resistencia mecánica y módulo de elasticidad estático en comparación con el hormigón con adición de fibras de caña de azúcar y el hormigón sin fibras adicionales. Dentro de los porcentajes propuestos, el más recomendado es el 2%, que es el que arroja mejores resultados.</p>	Ensayar otro tipo de fibras como el coco, o el sisal, con el fin de tener un análisis en profundidad de la viabilidad económica y también con el objetivo de reutilizar la materia prima. Se recomienda un estudio profundo de las propiedades de cada fibra vegetal presentada, así como el estudio de la durabilidad del hormigón con la adición de las mismas, ya que las fibras pueden degradarse con el tiempo. También se recomienda el estudio de algún tratamiento para aplicar debajo de las fibras, antes de añadirlo al hormigón. En el caso de adición de fibras que solo fueron lavadas y secadas, también se recomienda el estudio del posible ataque de insectos al hormigón, ya que las fibras pueden contener residuos de almidón y azúcares	(Ferreira et al., 2017)

Tesis	2017	Ecuador	Yute	<p>Influencia de la fibra de yute en el diseño de hormigones para resistencia a la compresión de 21 a 35 MPA con agregados de la cantera de piño</p>	<p>A causa, de la adición del 0.2% de fibra de yute se demostró que en los hormigones provoca un razonable incremento de la capacidad de deformación, siendo también una de las mejores maneras de incrementar la tenacidad de los mismo.</p> <p>En cuanto al desempeño mecánico de la muestra patrón y los especímenes reforzados con fibra de yute, se obtuvo un buen resultado de mezcla eliminando la retracción plástica de la misma, por lo que su influencia fue positiva.</p>	<p>Evaluar la protección de las fibras, pues al ser un material polimérico natural es altamente atacable por el medio alcalino que produce una matriz de hormigón.</p> <p>Se recomienda continuar con procedimientos experimentales encaminados a diseñar elementos estructurales específicos donde su aplicación sea ventajosa.</p>	<p>(Ramón Augusto, 2017)</p>
-------	------	---------	------	--	---	--	------------------------------

Fuente: Autor, (2020).

Anexo B: Protocolo de selección y meta-análisis

Para el desarrollo de la perspectiva teórica fue necesario exponer y analizar las teorías existentes en cuanto a fibras de fique y fibras de polipropileno, conceptualizaciones, investigaciones previas y los antecedentes en general que se consideraron válidos para encuadrar el estudio. (Sampieri et al., 2014). De modo que para cumplir con el objetivo de la investigación fue necesario la inmersión en el conocimiento existente, identificando el sumario del tema y los hallazgos más importantes.

Tabla 6. Hoja de protocolo de selección. Elaborada por el Autor.

1. Autor	
Nombre:	Pablo Jaramillo
Nivel de formación:	Estudiante pregrado
Nº de autores:	1
2. Base de datos:	Google Scholar
3. Acceso completo del estudio:	Base de datos online
4. Datos relacionados con la publicación:	
Tipo de publicación:	Tesis
Título:	Mejora de las condiciones de durabilidad de la fibra de fique como elemento reforzante del concreto.
Revista:	Repositorio Universidad Pontificia Bolivariana
Año publicación:	2017
Disponible en:	https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/5009/Mejora%20condiciones%20durabilidad%20fibra%20fique.pdf?sequence=1
País de origen del artículo:	Colombia
Idioma:	Español
5. Fibra usada:	Fique
6. Tipo de ensayo o muestra:	Ensayo de impacto y ensayo de flexión
7. Objetivo del estudio:	Lograr mediante la mezcla de una matriz cementante y el uso de fibras de fique tratadas con una sustancia hidrofóbica, tratadas con una sustancia hidrofóbica, reducir la reacción de los alcalinos del concreto con los componentes orgánicos de las fibras con el fin de aumentar la durabilidad del material compuesto, y encontrarle un uso eficiente como material de construcción.
8. Justificación:	Con la generación de un material compuesto de una matriz cementante y la fibra de fique como agente reforzante y que responda correctamente al problema de durabilidad, permitiendo su uso en el medio constructivo, se generan muchos beneficios, como lo son las ventajas de la utilización de una materia prima regional, que a su vez es un recurso renovable, como sustituto de otros agregados o agentes reforzantes, creando así que no se gasten recursos no renovables en el desarrollo del producto final y a su vez se disminuya la huella de carbono, además de generar una ayuda y un beneficio ambiental.
9. Metodología del estudio:	Cuantitativa
10. Instrumentos usados:	La edad afecta directamente la durabilidad de las probetas, posiblemente por el proceso de reacción de los alcalinos del concreto con los componentes orgánicos de las fibras de fique. Las fibras de fique no permiten una rotura completa del material y le dan características dúctiles.
11. Análisis de datos:	Se observa como las probetas de fibra de vidrio tipo E alcanzan una mayor resistencia a la flexión sin embargo a pesar de no poseer componentes orgánicos también son afectadas por los alcalinos del concreto a través del tiempo, lo que no pasa con la fibra de fique + agave ya que esta presenta una resistencia a la flexión estable a pesar del paso del tiempo, al igual que lo hace la fibra de fique + hidrofóbico, sin embargo esta presenta mayores resultados en cada una de las edades.
12. Resultados del estudio:	Los tableros con matriz cementante y fibra de fique como agente reforzante, presentan una notable disminución en su resistencia proporcional a la edad de la muestra. A pesar de que a los 14 días cumple con una resistencia competitiva con respecto a la fibra de vidrio, la fibra de fique pierde durabilidad rápidamente.
13. Conclusiones del estudio:	Los mejores resultados obtenidos en cuanto a la resistencia al impacto fueron por parte de las probetas de fibra de fique + hidrofóbico, estando por encima de las probetas de fibra de vidrio, además se observa que se obtuvo una estabilidad en la resistencia al impacto en las probetas de fibra de fique + agave que no se vio afectada por el paso del tiempo, aunque obteniendo resultados apenas por encima de la fibra de fique no procesada.
14. Nuevo conocimiento resultante:	

Tabla 7. Hoja de protocolo de selección. Elaborada por el Autor.

1. Autor	
Nombre:	Carlos Pinto, Leidy Figueroa
Nivel de formación:	Estudiante pregrado
N° de autores:	2
2. Base de datos: Google Scholar	
3. Acceso completo del estudio: Base de datos online	
4. Datos relacionados con la publicación:	
Tipo de publicación:	Tesis
Título:	Determinación del comportamiento mecánico de un concreto adicionado con fibra de fique a partir de sus resistencia a la tracción, flexión y compresión.
Revista:	Repositorio Universidad Industrial de Santander
Año publicación:	2016
Disponible en:	
Pais de origen del artículo:	Colombia
Idioma:	Español
5. Fibra usada: Fique	
6. Tipo de ensayo o muestra: Ensayo de impacto y ensayo de flexión	
7. Objetivo del estudio: Determinar el comportamiento mecánico de un concreto adicionado con fibra de fique a partir de su resistencia a la tracción, flexión y compresión.	
8. Justificación: Comprobar que la utilización de las fibras naturales es una herramienta viable, generando beneficios para la industria de la construcción y para la industria fiquera ya que se le daría una aplicación diferente a la que se ha venido dando por años a la fibra de fique, además porque permite conocer el comportamiento del concreto cuando es reforzado con fibras naturales, también promueve la investigación en este tipo de material en el grupo de Investigación INME.	
9. Metodología del estudio: Cuantitativa	
10. Instrumentos usados:	
11. Análisis de datos: La densidad de la fibra de fique tiene un valor de 21,31 (tex) lo cual corresponde a valores de resistencia a la tracción donde se halló la resistencia mínima de 12,49 (cN/tex) y máxima de 38,70 (cN/tex), así mismo se halló la deformación mínima de 3,22% y máxima de 7,54% debido a que la fibra presentaba diámetros variables por lo que sus propiedades mecánicas a establecer mediante un rango mínimo y máximo tal cual como se realizó.	
12. Resultados del estudio: El concreto adicionado con fibra de fique con adición de 10 y 30 mm superó el módulo de rotura de la resistencia a la flexión del concreto no adicionado en un 112,79% y 111,15%, de tal manera que es posible afirmar que la adición de fibra confirió al concreto un aumento en su resistencia a la flexión mayor al 10% y así mismo su deformación incrementó, lo anterior atribuido posiblemente a la matriz formada por el concreto y la fibra embebida en el mismo, generando una distribución de esfuerzos más uniforme.	
13. Conclusiones del estudio: La fibra de fique presenta propiedades mecánicas apropiadas para ser utilizada como adición para el diseño de mezcla de concreto. La fibra como adición aumenta la absorción de energía y deformación del concreto tras someterse al ensayo de flexión, es decir; ayuda a incrementar la magnitud del módulo de rotura. Además la fibra actúa como una red que reduce la tendencia del concreto a fracturar violentamente al llegar al esfuerzo de falla en compresión, tensión indirecta y flexión.	
14. Nuevo conocimiento resultante: Al evaluar las propiedades mecánicas de la adición de fibra en las dos longitudes estudiadas, 10 y 30 mm; se determinó que el concreto con adición de fibra de fique de 10 mm presentó el mejor comportamiento mecánico.	

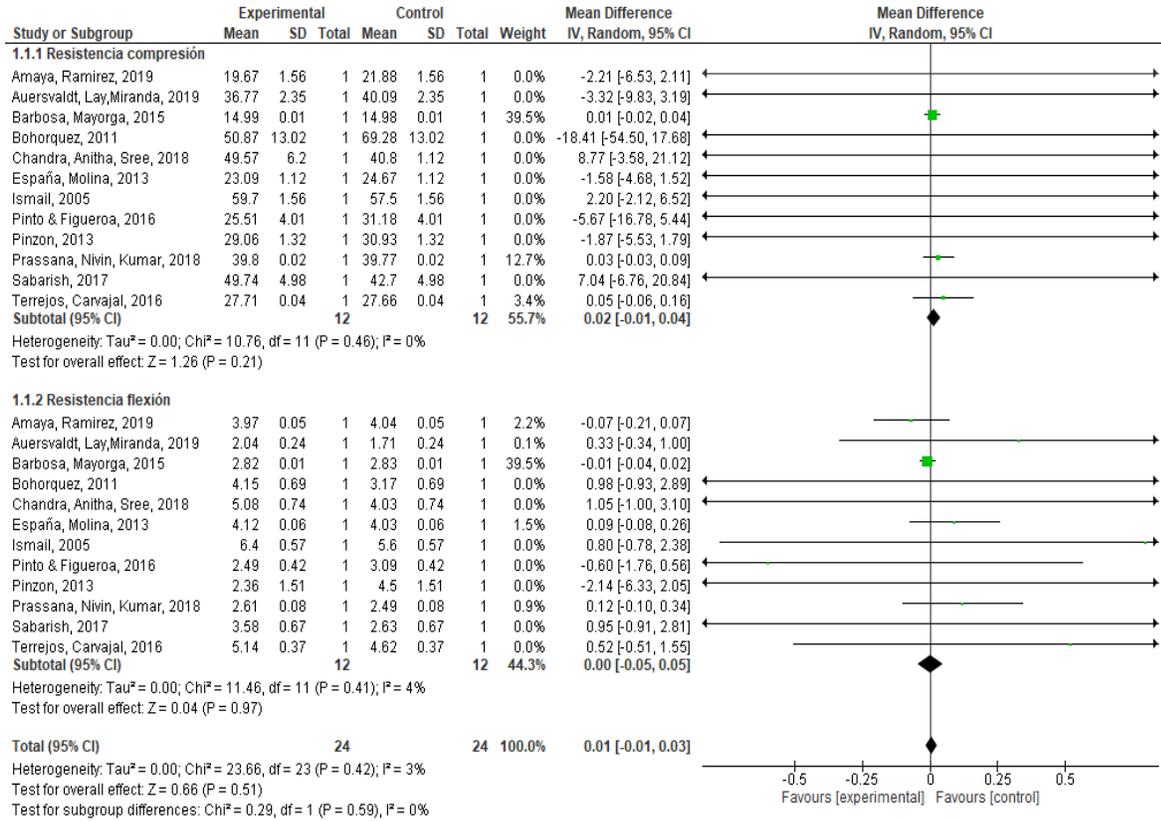
Tabla 8. Hoja de protocolo de selección. Elaborada por el Autor.

1. Autor	
Nombre:	Sandra Pinzón
Nivel de formación:	Docente
N° de autores:	1
2. Base de datos: Google Scholar	
3. Acceso completo del estudio: Base de datos online	
4. Datos relacionados con la publicación:	
Tipo de publicación:	Artículo
Título:	Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique
Revista:	Repositorio Universidad Piloto de Colombia
Año publicación:	2013
Disponible en:	http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5873
País de origen del artículo:	Colombia
Idioma:	Español
5. Fibra usada: Fique	
6. Tipo de ensayo o muestra: Ensayo de impacto y ensayo de flexión	
7. Objetivo del estudio: Evaluar el comportamiento del concreto con la adición de la fibra de fique, para saber si aporta favorablemente a las propiedades de compresión y flexión del concreto.	
8. Justificación: En Colombia por ser un país productor e impulsor del sector fiqueero, se considera importante hallar mayor utilidad a este material en la industria de la construcción, puntualmente en la fabricación del concreto en diferentes estructuras y procesos constructivos.	
9. Metodología del estudio: Cuantitativa	
10. Instrumentos usados:	
11. Análisis de datos: La resistencia que presentan las muestras de concreto con adición de fibra de fique para 14 Mpa (2000 psi), alcanza su mayor valor en el fique al 1.0% en los periodos de 7, 21 y 28 días. Las muestras con adición de fique con mejor comportamiento a la compresión fue la que tiene porcentaje del 0.5% alcanzando a los 28 días unos 3.89 Mpa (555 psi) que corresponde un 28% al diseño de la mezcla.	
12. Resultados del estudio: Al incrementar porcentajes de fibra de por encima de 0.5% se presentan disminuciones considerables en la resistencia a la compresión y en su densidad haciendolo mas liviano y susceptible a la falla.	
13. Conclusiones del estudio: Los contenidos de fibra de fique adicionados al concreto no causan ni producen mayor resistencia a la compresión, al contrario la resistencia presentada estuvo por debajo de la del concreto convencional a excepción de los datos arrojados para el diseño de 28 Mpa que con una adición de 0.3% de fibra de fique se obtuvo una resistencia de 29.06 Mpa.	
14. Nuevo conocimiento resultante: Porcentaje óptimo para la adición de fibra de fique al concreto es de un valor cercano a 3.3 Kg/m3 de concreto o 0.3% de peso con respecto al agregado fino.	

Tabla 9. Hoja de protocolo de selección. Elaborada por el Autor.

1. Autor	
Nombre:	Jonny Jiménez
Nivel de formación:	Estudiante de pregrado
Nº de autores:	1
2. Base de datos: Google Scholar	
3. Acceso completo del estudio: Base de datos online	
4. Datos relacionados con la publicación:	
Tipo de publicación:	Tesis
Título:	Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (fibra de fique)
Revista:	Repositorio Universidad La Gran Colombia
Año publicación:	2011
Disponible en:	https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/1137
País de origen del artículo:	Colombia
Idioma:	Español
5. Fibra usada: Fique	
6. Tipo de ensayo o muestra: Ensayo de impacto y ensayo de flexión	
7. Objetivo del estudio: Determinar los cambios en las propiedades mecánicas del concreto mediante la adición de materiales alternativos como la fibra de fique.	
8. Justificación: La fibra de fique es una alternativa para el insumo en el desarrollo de concretos ligeros, económicos y perdurables que buscan la manera de reemplazar materiales como el acero, en donde su costo y consecución elevan económicamente el precio de una vivienda.	
9. Metodología del estudio: Experimental	
10. Instrumentos usados:	
11. Análisis de datos: La adición de fibras entre el 0.5% y el 1.5% son las recomendadas en volumen. La resistencia aumentó con una adición superior, en	
12. Resultados del estudio: Para obtener un mejor mezclado de la fibra es recomendable utilizar longitudes entre los 2 cm y 5 cm para que esta no se aglomere y se distribuya con mejor uniformidad y logre una mejor matriz con el concreto.	
13. Conclusiones del estudio: La resistencia a la compresión disminuye con la adición de 1.0% y 1.5% de fibras, siendo la mayor resistencia la de mas volumen. Al querer obtenerse ganancia en la resistencia a la flexión se debe sacrificar resistencia a la compresión. Sin embargo, esta pérdida de resistencia se ve acompañada de una mejor unión en la matriz de concreto en donde las fibras transmiten una mejor distribución de las cargas axiales conduciéndoles a una mejor distribución.	
14. Nuevo conocimiento resultante: Aunque la fibra de fique afecta la resistencia a la compresión, indiscutiblemente mejora la resistencia a la flexión, lo cual obtiene un resultado interesante para el uso de materiales como las fibras naturales. Como las propiedades mecánicas que ofrecen las fibras de fique en los elementos de concreto estan en la resistencia a la flexión, se puede recomendar el uso en la construcción de losas, dinteles y vigas de mediana longitud.	

Tabla 10. Forest plot para evaluar la heterogeneidad. Concreto con fibras de naturales vs. Concreto simple para el mejoramiento de la resistencia a compresión y flexión.



Fuente: Elaborado por la autora basado en la revisión de literatura, apoyado en RevMan Manager 5.4.

Anexo C: Resultados ACV GaBi.

Tabla 11. Emisiones del proceso de manufactura de las fibras de polipropileno. Elaborado por el autor.

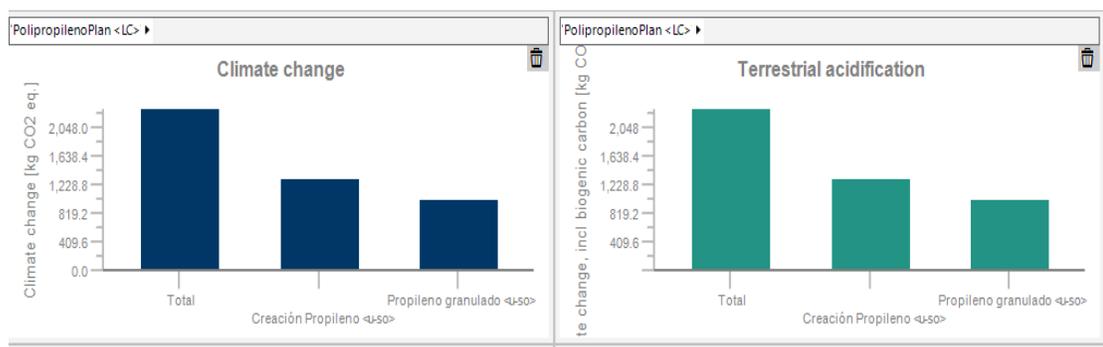


Tabla 12. Emisiones del proceso de manufactura de las fibras de fique. Elaborado por el autor.

